



VLIV VLÁKENNÉ VÝZTUŽE NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI OMÍTKOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Diplomová práce

Studijní program: N3106 – Textilní inženýrství
Studijní obor: 3106T017 – Oděvní a textilní technologie
Autor práce: **Bc. Petra Kryšková**
Vedoucí práce: Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.





EFFECT OF FIBER REINFORCEMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS PLASTER

Diploma thesis

Study programme: N3106 – Textile Engineering
Study branch: 3106T017 – Clothing and Textile Engineering
Author: **Bc. Petra Kryšková**
Supervisor: Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.



Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jeho skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucí mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat především vedoucí své diplomové práce Ing. Miroslavě Maršákové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné rady. Dále děkuji Danuši Steklé, Vlastě Kopecké a Ing. Janě Grabmüllerové za pomoc při práci v laboratořích.

Díky samozřejmě patří také celé mé rodině za všeobecnou podporu při studiu.

Abstrakt

Diplomová práce s názvem Vliv vlákenné výztuže na mechanické vlastnosti omítkových kompozitních materiálů je rozdělena do tří částí. V rešeršní části jsou popsány a definovány obecně kompozitní materiály. Dále se tato část věnuje popisu omítek a vláken vhodných pro jejich vyztužení.

V experimentální části je řešena příprava omítkových kompozitů včetně vlákenné výztuže a popis jednotlivých zkoušek, které byly zvoleny pro testování mechanických vlastností omítkových kompozitů vyztužených skleněnými nebo čedičovými vlákny.

Část nazvaná diskuze výsledků obsahuje číselné, slovní i grafické vyjádření výsledků testů a jejich shrnutí.

Klíčová slova

Omítkový kompozit

Kritická délka vlákna

Testování omítkových kompozitů

Vlákenná výztuž

Abstract

This thesis titled Effect of fiber reinforcement on the mechanical properties of composite materials plaster is divided into free parts. In the search part are described and defined generally composite materials. This part also deals with description of plaster and fiber which are suitable for the reinforcement.

In the experimental part is preparation of plaster composites including fibrous reinforcement and a description of the tests, which have been chosen for testing mechanical properties plaster reinforced composites with glass or basalt fiber.

Part named Discussion of Results contains numerical, verbal and graphic formulation results of tests and their summary.

Key words

Plaster composite

Critical length of fiber

Testing of plaster composites

Fiber reinforcement

Obsah

1	Úvod	10
2	Rešeršní část.....	11
2.1	Kompozitní materiály.....	11
2.1.1	Klasifikace kompozitních materiálů	11
2.1.2	Směrové uspořádání výztuže vláknenných kompozitů.....	14
2.1.3	Kritická délka vláken	14
2.1.4	Vlastnosti kompozitů	14
2.1.5	Výroba kompozitů	15
2.1.6	Kompozity ve stavebnictví	15
2.2	Omítky.....	17
2.2.1	Rozdělení omítek podle složení	18
2.2.2	Dělení omítek podle použití.....	19
2.2.3	Základní vlastnosti omítek.....	19
2.2.4	Omítka ThermoUM Xtra	20
2.3	Vlákna pro kompozitní materiály.....	21
2.3.1	Čedičová vlákna.....	21
2.3.2	Skleněná vlákna	25
2.3.3	Lýková vlákna.....	28
3	Experimentální část.....	31
3.1	Vstupní parametry vláken	31
3.1.1	Pevnost vláken	31
3.1.2	Průměr vláken	32
3.1.3	Soudržnost vláken s matricí.....	33
3.1.4	Objemová hmotnost vláken	34
3.2	Vstupní parametry omítky.....	34

3.2.1	Modul pružnosti omítky.....	35
3.2.2	Objemová hmotnost omítky.....	35
3.3	Kritická délka vláken	35
3.4	Výpočet směsovacího poměru výztuže a matrice	38
3.5	Zkouška trojbodým ohybem	39
3.5.1	Příprava vzorků pro trojbodý ohyb	40
3.5.2	Průběh zkoušky	40
3.6	Charpy test	41
3.6.1	Příprava vzorků pro Charpyho test	41
3.6.2	Průběh zkoušky	42
3.7	Pevnost v tlaku	42
3.7.1	Příprava vzorků pro měření pevnosti v tlaku.....	43
3.7.2	Postup zkoušky	43
4	Diskuze výsledků	44
4.1	Zkouška trojbodým ohybem	44
4.2	Charpy test	47
4.3	Pevnost v tlaku	48
5	Závěr.....	51
	Použitá literatura	53
	Seznam obrázků.....	55
	Seznam tabulek	56

Seznam zkratk

α	aspektní poměr	[-]
ρ_i	hustota i-té složky	[kg/m ³]
ρ_o	hustota omítky	[kg/m ³]
ρ_v	hustota vláken	[kg/m ³]
σ	napětí	[MPa]
τ_m	soudržnost vláken s matricí	[N/mm ²]
A	plocha řezu	[mm ²]
A_n	rázové houževnatost	[J/mm ²]
b	šířka vzorku	[mm]
<i>CMC</i>	Ceramic Matrix Composites	
d	průměr vláken	[mm]
E	modul pružnosti, počáteční modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	normálová síla	[N]
F_v	pevnost vláken	[N]
h	výška vzorku	[mm]
L	vzdálenost podpěr	[mm]
l	konečná délka vláken	[mm]
l_c	kritická délka vláken	[mm]
l_v	efektivní délka vláken	[mm]
m	hmotnost	[g]
<i>MMC</i>	Metal Matrix Composites	
<i>PMC</i>	Polymeric Matrix composites	
R_f	napětí v ohybu	[MPa]
R_m	pevnost v tlaku	[N/mm ²]
R_{mv}	pevnost vlákna	[N]
T	jemnost	[tex]
V_i	objem i-té složky	[mm ³]
V_o	objem omítky	[mm ³]
W	deformační energie	[J]
w_i	hmotnostní podíl i-té složky	[-]
X	průhyb vzorku	[mm]

1 Úvod

S kompozitními materiály se setkáme v přírodě i průmyslovém odvětví. Najdeme je převážně v průmyslu strojním, automobilovém a stavebním. Vyskytují se však také v medicíně, textiliích a mnoha dalších. V dnešní době se kompozity dostávají do popředí a v mnoha případech již klasické materiály vytlačily. Je to dáno zejména tím, že u nich dokážeme docílit stejných vlastností, jako mají klasické materiály, avšak při mnohem nižší hmotnosti. Ve stavebním průmyslu se velmi často setkáme s fibrilárními kompozity. K vyztužování jsou používána nekonečná vlákna ve formě rovingů nebo tkanin (mřížek) z nich vytvořených, nebo krátká nasekaná vlákna. Armovací tkaniny se pro zpevňování omítek používají běžně. S krátkovláknennou výztuží se zatím setkáváme především u vyztužování betonů.

Tato práce se zaměřuje na vyztužování termo-izolační omítky krátkými vlákny. Snaží se zjistit, jakým způsobem budou ovlivněny mechanické vlastnosti dané omítky, pokud do její struktury budou přidána vlákna ve formě krátkovláknenné výztuže. Jedná se o běžně určované parametry omítek – napětí v ohybu, modul pružnosti v ohybu a pevnost v tlaku. Pro lepší vyhodnocení je přidána i rázová houževnatost. K experimentu byly předvybrány 3 druhy vláken – skleněná, čedičová a konopná. U každého typu vlákna jsou zhodnoceny jeho parametry, na jejichž základě byla pro vyztužení vybrána vlákna skleněná a čedičová. Z nich jsou vyrobeny 3 sady vzorků, každá sada je vyztužena vlákny v jiném poměru. Obsah vláknenné výztuže ve vzorcích byl podle dostupných informací stanoven na 1 %, 2 % a 3 %.

Hlavním úkolem této práce je vyrobit vzorky samotné omítky a omítkového kompozitu vyztuženého vlákny a pomocí různých zkoušek zjistit, jak jsou přítomností vláken ve struktuře ovlivněny mechanické vlastnosti omítky. V závěru práce pak shrnout výsledky a zhodnotit, zda se vláknenná výztuž na vlastnostech výsledného kompozitu projevila, popřípadě doporučit, který druh vláken v jakém poměru se pro vyztužení dané omítky jeví jako nejvhodnější.

2 Rešeršní část

2.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály, které se skládají ze dvou či více složek, jež jsou od sebe rozpoznatelné. Tyto složky se většinou liší mechanickými, chemickými nebo fyzikálními vlastnostmi. Kompozit je složený z výztuže a látky, která ji spojuje – matrice. Výztuží obvykle bývá tvrdší, tužší, pevnější a obvykle nespojitá složka. Matrice je naopak poddajnější než výztuž a má v kompozitu funkci pojiva výztužné složky. Cílem kompozitu je vylepšit mechanické vlastnosti matrice pomocí výztuže. Jedná se například o tvrdost, pevnost, modul pružnosti v tahu a další. Na tyto mechanické vlastnosti mají vliv jak vlastnosti a druh výztuže, tak i vlastnosti a druh matrice. Dále jsou vlastnosti kompozitu ovlivněny soudržností matrice a výztuže, objemovým podílem obou složek a směrové uspořádání výztuže. Hlavním charakteristickým znakem kompozitních materiálů je synergický efekt. Jedná se o spolupráci jednotlivých složek. Alespoň jedna vlastnost výsledného kompozitu musí být vyšší než prostý součet vlastností jednotlivých vstupujících složek. Existuje mnoho kompozitů, na které jsou kladeny speciální požadavky, jako jsou vysoká pevnost, tuhost, houževnatost, odolnost vůči extrémním teplotám nebo třeba velmi nízká hmotnost. Pro tyto kompozity se používají látky amorfni (sklo, plasty), částečně krystalické (plasty) a polykrystalické (keramika, kovy). [9] [14]

Je důležité, aby matrice i výztuž byly pevné látky o stálých rozměrech, ve všech místech homogenní. U žádného z materiálu však nejsou požadavky na homogenitu a izotropní chování zcela splněny. Homogenita závisí na rozlišitelnosti struktury povrchu, izotropní chování je pak problémem zejména u vlákenných výztuží. Ty mají většinou odlišné vlastnosti ve směru osy vlákna a ve směru na ni kolmém. Snažíme se tedy o co nejvyšší možnou homogenitu a izotropní vlastnosti. [11]

2.1.1 Klasifikace kompozitních materiálů

Základní dělení kompozitů je podle druhu matrice, podle geometrického charakteru výztužné složky, podle druhu výztuže a podle jejího uspořádání.

2.1.1.1 Dělení podle druhu matrice

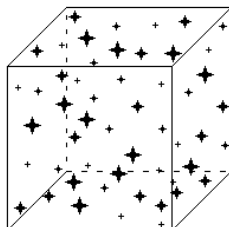
- a) S polymerní matricí (PMC) – termoplastická, reaktoplastová, elastomerní
- b) S kovovou matricí (MMC)
- c) S keramickou matricí (CMC) - cermety
- d) S anorganickou matricí – železobetony
- e) Speciální typy – skleněná, uhlíková, čedičová vlákna

[14]

2.1.1.2 Dělení podle geometrického charakteru výztuže

- a) Partikulární
- b) Granulární
- c) Lamelární
- d) Firbilární

Partikulární – jedná se o částice různého tvaru. Jako částicové kompozity jsou považovány materiály, jejichž struktura je vyrobena matricí zpevněnou malými částčkami. Rozměr výztužných útvarů nepřesahuje ostatní rozměry (výztužná částice obvykle nepřesáhne 1 μm). Matrice částicových kompozitů jsou obvykle kovové, polymerní nebo keramické. Částice, které tyto matrice vyztužují, jsou kovy, kysličníky kovů nebo keramika.



Obr. 2.1: Částicový kompozit

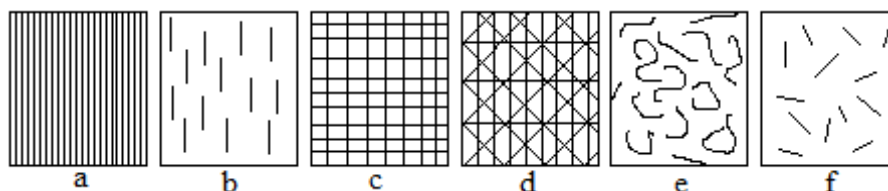
Při výrobě částicových kompozitů je důležité dodržet podmínku minimálního rozdílu koeficientu teplotní roztažnosti obou spojovaných složek. Koeficient teplotní roztažnosti by neměl přesahovat hodnotu $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Při nedodržení koeficientu dochází při zvýšené teplotě k vnitřnímu pnutí, které redukuje pevnost těchto materiálů. Za částicové kompozity lze považovat i keramiku nebo pryž. Obojí jsou hmoty obsahující drobné částice. [9] [14]

Granulární – jsou takové, jejichž rozměry nejsou osově rozdílné.

Lamelární – u těchto výztuží je jeden rozměr oproti dvěma ostatním řádově menší. Jedná se o tloušťku, která je proti délce a šířce destičky zanedbatelná.

Fibrilání (vlákenné) – u vlákenných kompozitů jeden rozměr výztuže výrazně převyšuje ostatní rozměry, a to délka vláken. Tento systém spojuje vlákna s pevností pryskyřice. Odolnost a pevnost vlákenných kompozitů se liší především druhem a uspořádáním vláken.

Vlákenné kompozity je možné rozdělit na kompozity vyztužené krátkými vlákny nebo vlákny dlouhými. Krátká vlákna mají poměr mezi délkou a průměrem menší než 100, dlouho-vlákenné mají poměr opačný, tedy poměr mezi délkou a průměrem je větší než 100. U vlákenných kompozitů pak také velice záleží na orientaci vláken v kompozitu. Orientace bývá náhodná nebo preferovaná. Vlákna mohou být uložena v jednom směru, většinou ve směru hlavní osy namáhání, nebo mohou být křížená, popřípadě je jejich orientace zcela nahodilá. Druhy uspořádání jsou na obrázku č. 2. 2. [9]



Obr. 2.2: Druhy vlákenných kompozitů

a – jednosměrná dlouhá vlákna, b – jednosměrná krátká vlákna, c – křížová tkanina, d – vícesměrné vyztužení, e – náhodná orientace vláken, f – náhodná orientace krátkých vláken

2.1.1.3 Dělení podle typu uspořádání výztuže

a) Částicové a granulární

- s náhodnou orientací
- s přednostní orientací

b) Dlouho-vlákenné jednovrstvé

- jednosměrné vyztužení
- dvousměrné vyztužení

c) Krátko-vlákenné jednovrstvé

- s náhodnou orientací
- s přednostní orientací

d) Lamináty

e) Hybridy

[14]

2.1.2 Směrové uspořádání výztuže vlákenných kompozitů

2.1.2.1 Jednoosé uspořádání vláken

Vlákna lze v matrici uspořádat tak, že jejich osy směřují v jednom směru. Tuto strukturu označujeme jako 1D uspořádání. Směr vláken je ve směru délky kompozitu. Směr, který je na vlákna kolmý, je šířka kompozitu. Jednoosého uspořádání můžeme dosáhnout tak, že konce vláken zafixujeme, nebo použijeme formování v proudící kapalině.

2.1.2.2 Rovinné uspořádání vláken

Osy vláken jsou rovnoběžné s osou nějaké roviny. Tato rovina je označována jako hlavní a struktura se nazývá 2D uspořádání. Rovinné uspořádání získáme náhodným rozložením vláken. Všechna vlákna jsou kolmá ke kolmici na hlavní rovinu. V tomto směru má kompozit výrazně odlišné vlastnosti.

2.1.2.3 Neuspořádané kompozity

V případě neuspořádaných kompozitů hovoříme jako o 3D strukturách. Tato vlákna nemají žádný preferovaný směr, jsou rozmístěna zcela náhodně. Zajímavostí je, že nejméně uspořádaná vlákna vyvolají nejvyšší symetrii. [10]

2.1.3 Kritická délka vláken

Při působení síly na kompozit by měla nejprve začít praskat vlákna. To odpovídá maximu napětí o hodnotě pevnosti vláken. Napětí na koncích vláken bývá nulové a roste směrem ke středu vláken. Z toho vyplývá, že se konce vláken na přenosu sil nepodílejí. To znamená, že čím je delší vlákno, tím je výztuž efektivnější. Proto existuje kritická délka, která označuje minimální délku, při které je vlákno schopno přenášet napětí až do velikosti jejich pevnosti. Pokud jsou vlákna kratší než je stanovena kritická délka, pak při namáhání kompozitu nepraskají (nepřenášejí sílu a napětí), nemají v něm tedy žádný účinek. [18]

2.1.4 Vlastnosti kompozitů

Kompozity jsou výhodné právě díky svým vlastnostem, které jdou v mnoha případech "ušít" na míru. Pro vlastnosti výsledného kompozitu je nutné pečlivě vybrat materiál na tvorbu matrice i výztuž. Je také potřeba dbát na směšovací poměr. Při špatném poměru mohou být požadované vlastnosti nedostatečné nebo zcela odlišné od požadovaných. Mezi hlavní vlastnosti kompozitů patří:

- ✓ Pevnost
- ✓ Nízká hmotnost
- ✓ Odolnost proti korozi a povětrnostním vlivům [11]

2.1.5 Výroba kompozitů

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| ✓ Ruční ukládání | ✓ Vytlačování |
| ✓ Lisování v přípravku | ✓ Tváření tahem |
| ✓ Navíjení | ✓ Vstřikování |
| ✓ Válcování tlakem | ✓ Prášková metalurgie |
| ✓ Nastříkávání | |

[10]

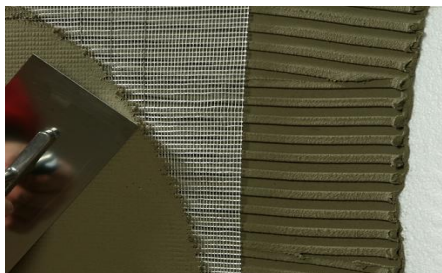
2.1.6 Kompozity ve stavebnictví

Využít spojení dvou či více materiálů při stavbě není nic nového. Například už ve Starém Egyptě se pro stavbu používaly nepálené cihly, které byly uvnitř zpevněny slámou. Stejný postup se v minulosti používal i při stavbě obydlí na našem území. Nejprve se stavěly chatrče z nevypalované hlíny vyztužené slámou, větvičkami nebo celými rohožemi vyrobenými z březových či vrbových větviček. Později se stavěly roubené domky. Zde se „kompozit“ vyskytoval v podobě těsnění mezi trámy. Jednalo se o směs hlíny a vláken. Vlákna byla převážně konopná nebo lněná. Ve směsích se však vyskytovala i vlna nebo drůbeží peří. Na stavbu bylo využito vše. Dnes se kompozity využívají především jako náhrada těžkých kovových prvků při stavbě domů, mostů a mnoha dalších konstrukcí. Kompozity mohou mít stejnou pevnost jako samotný kov, avšak jejich hmotnost je několikanásobně nižší. Kompozity se kromě nosných konstrukcí používají také jako rošty, schodiště, opláštění budov, nádrže, dělicí stěny a podobně. Kompozitní materiály jsou velmi odolné proti vnějším vlivům, jako je například koroze, UV záření, vítr a déšť. Splňují požadavky na dlouhou životnost a nevyžadují téměř nebo vůbec žádnou údržbu.

2.1.6.1 Vyztužení omítek

Pro zajištění pevnosti a celistvosti struktury omítek se používají různé výztuže. U vnitřních omítek dochází k vyztužování především v citlivých oblastech (rohy, přehyby u parapetů a různé hrany). Zpevňování vnějších omítek je nutné v celé omítnuté ploše. Omítka tak lépe odolá povětrnostním vlivům.

Při poškození se omítka neodloupne a nepadne, nešíří se trhliny od případných prasklin. Vložením výztuže v jakékoliv formě do omítky vzniká kompozit.



Obr. 2.3: Vyztužení omítky perlínkou ze skleněných vláken [13]

2.1.6.1.1 Druhy výztuží

- a) Plošné
- b) Vláknenné

2.1.6.1.2 Plošné výztuže

Tyto výztuže jsou zhotoveny nejčastěji tkaním. Dále se pak používají kovové hustě perforované pláty. Nejvíce se pro armování fasád používá armovací mřížka, známá jako perlina. Základní surovinou pro výrobu těchto výztužných mřížek je sklo (skleněné vlákno). Je však nutné dbát na druh skla, protože jen některé druhy jsou vůči alkáliím odolné dlouhodobě. Jinými využívanými sítěmi jsou ty z uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost v tahu a mají poměrně nižší plošnou hmotnost. Další ocenitelnou vlastností jak uhlíkových, tak skleněných vláken je zdravotní nezávadnost. Armovací tkanina musí být upevněna v horní třetině omítkové vrstvy, to znamená, že musí být blíže k lici fasády. Nejprve se nanese 1 – 1,5 cm první vrstvy omítky, pak se do ní zatlačí výztužná síťovina a nakonec se nastříká (nanese) poslední vrstva omítky. Pro vyztužování je vhodná i basaltová tkanina s kolmými směry vláken. Tkanina se používá jako výztužná vložka do polymercementových hmot. Používá se především pro kotvení na problematických podkladech nebo v chemicky agresivním prostředí. Materiály jako skleněná nebo basaltová vlákna pro svou nízkou hmotnost a nesrovnatelně nižší cenu vytlačují z popředí dříve používané kovové (železné, ocelové a hliníkové) výztuže.

[12]

2.1.6.1.3 Vláknenné výztuže

Tento typ výztuže je ve vláknenné formě. Přidávání vláknenné výztuže do omítek je teprve ve fázi zkoumání. Více se používají do betonů a betonových směsí. K vyztužení se využívají jak samostatná vlákna, tak vláknenné útvary složené z jednotlivých vláken. Lamely jsou jedním z typů vláknenné výztuže. Nejčastěji jsou vyrobené ze skleněných a uhlíkových vláken a dávají se jako dodatečná externí lepená výztuž.

Pro zpevnění omítek se také používají ojednocená vlákna. Nejvíce skelná nebo polymerní vlákna. Firma EMACO vyrábí speciální opravnou maltu, která obsahuje specifická polymerní vlákna, která výrazně omezují riziko a sklon k vytváření trhlin. Výrobkem přidávaným do omítek je POLYFIX PP od firmy BETONSAN. Jedná se o polypropylénová vlákna, která jsou při výrobě lubrikována, aby se ve směsi lépe rozptýlila. Přidáním PP vláken se omezuje nejen vznik trhlin, ale také výrazně zvyšuje mrazuvzdornost, vodotěsnost a otěruvzdornost povrchů. V případě POLYFIX ARG jde o vlákna skleněná. I u těchto vláken se zlepšuje mrazuvzdornost, vodotěsnost a odolnost proti vzniku trhlin. Skleněná i polypropylénová vlákna se přidávají do čerstvě umíchané omítky, malty nebo betonu. [12]

2.2 Omítky

„Omítka je jedno nebo vícevrstvá úprava stěn a stropů. Má estetickou funkci – spoluvytváří konečný vzhled povrchu, a zároveň musí splňovat stavebně-fyzikální nároky stavby. Z historického hlediska je prvním uměle připraveným stavebním materiálem malta. Již na starořímských stavbách nalézáme například nejen tehdy běžné vápenné malty, ale i malty na bázi hydraulického vápna, které tvrdly i pod vodou. V průběhu staletí se technologie výroby malt pro omítky příliš neměnila. Omítky se lišily především způsobem zpracování povrchu v průběhu jednotlivých historických období a architektonických stylů. Teprve s nástupem cementu došlo k rychlejšímu vývoji výroby malt. Od konce šedesátých let minulého století umožnila průmyslová výroba omítek výrazné rozšíření sortimentu malt pro omítky, a to používáním přesně definovaného pojiva i plniv, a zejména pak dávkováním speciálních přísad (podle Blahy, 2009).“ [3]

2.2.1 Rozdělení omítek podle složení

Omítka vzniká po ztvdnutí maltové směsi, která je složena z plniva, pojiva a speciálních přísad. Hlavním kritériem, podle kterého se omítky rozdělují, je druh pojiva. V tabulce 2.1 je uvedeno rozdělení omítek podle složení.

Tab. 2.1: Rozdělení omítek dle složení

Typ pojiva	Typ omítky	Druh pojiva	Oblast použití
minerální	vápenná	vápno, hydraulické vápno	vnitřní omítky, restaurování
	vápenocementová	vápno, cement	běžné omítky (sanační, tepelně-izolační, akustické...)
	cementová	cement	
	sádrová	sádra	vnitřní a protipožární omítky
	hliněná	jíl	tenkovrstvé omítky, vysprávky
organické	silikonová	silikonová disperze	vnitřní omítky, zdravé bydlení, ekologické restaurování
	disperzní	akrylátová disperze	
	silikátová	vodní sklo, disperze	

Pojivo zajišťuje především dobré přilnutí ke zdivu, samotnou pevnost omítky a její trvanlivost (schopnost odolat působení vlivu z okolí). Minerální pojiva lze kromě hlavního dělení v tabulce 4 rozdělit také na vzdušná, hydraulická a organická. [3]

Vzdušná pojiva – umožňují zatvrdnutí omítky na vzduchu a vytvářejí v běžných podmínkách stálou a trvanlivou úpravu povrchu. Avšak malta s tímto druhem pojiva ztrácí své vlastnosti působením vody (sádra, jíl, vápno).

Hydraulická pojiva – takový druh pojiva, který je trvale odolný působení vody. Malta, do níž je přidáno hydraulické pojivo, tuhne i pod vodou (hydraulické vápno, cement).

Organická pojiva – jedná se především o speciální disperze.

2.2.2 Dělení omítek podle použití

- **Sanační omítky** – mají porézní strukturu a díky vnitřní hydrofobitě mají schopnost eliminovat vliv vztlínající vlhkosti ve zdivu.
- **Tepelně-izolační omítky** – obsahují přidané látky (např.: polystyren), díky kterému po vyzrání dosahují specifické hmotnosti menší než 300 kg/m^3 . Pro tepelnou izolaci se používá omítka v minimální vrstvě 0,5 cm. U tohoto druhu omítek je velmi důležité zpevnění (perlínka, speciální textilní bandáže...).
- **Akustické omítky** – mají porézní strukturu, díky čemuž lépe pohlcují zvuk. Na našem trhu se objevují omítky, které při tloušťce 20 mm pohltnou zvuk nad 500 Hz. Značnou nevýhodou však je struktura povrchu, který nelze natřít. [3]

2.2.3 Základní vlastnosti omítek

- ✓ **Prodyšnost** – schopnost konstrukce propouštět vodní páry v případě, že jsou rozdílné tlaky uvnitř a vně. Tyto typy se používají v případě tepelně-izolačních omítek.
- ✓ **Vodoodpudivost** – opačná vlastnost nasákavosti. Tato vlastnost zamezí pronikání vody do pokladu. Zároveň snižuje možnost ulpívání vody na povrchu omítky. Použití těchto omítek se projeví rychlejším osycháním po dešti, menší špinavostí a snadnějším čištěním fasád.
- ✓ **Odolnost proti mikroorganismům** – přirozenou schopnost odolat mikroorganismům mají materiály na bázi vodního skla a minerální materiály. Ostatním typům omítek se tyto vlastnosti uměle dodávají přidáním biocidních prostředků do základní směsi.
- ✓ **Pružnost** – schopnost omítek odolat určitému namáhání, zejména pak namáhání při tepelné roztažnosti omítky.
- ✓ **Citlivost na podmínky při provádění** – jedná se o reakci omítky nežádoucím způsobem na krajní teplotní, vlhkostní a další podmínky při realizaci.

Nejčastějším typem omítek jsou ty, se kterými nelze omítat v mrazu. Teplotní rozpětí pro jejich použití se pohybuje od $+5 \text{ °C}$ do 20 °C . Příliš teplé počasí nebo přímý sluneční svit způsobuje příliš rychle vyschnutí omítky, což mívá za následek vznik trhlin a ztrátu pevnosti a soudržnosti s podkladem. Příliš vysoká vzdušná vlhkost zase ovlivňuje dobu tuhnutí. V tabulce 2.2 jsou uvedeny vady, příčiny a předcházení jejich vzniku při omítání fasád. [13]

Tab. 2.2: Přehled vad omítek, jejich příčiny a předcházení

	Přímý sluneční svit	Vítr	Vysoká vlhkost, mlha, déšť
Co způsobuje	Přehřátý podklad, stíny lešení, rychlé zasychání.	Rychlejší a nepravidelné zasychání omítky.	Prodlužuje dobu schnutí omítek.
Jak se projevuje	Nesprávná struktura v rizikových místech (přechody pater, nerovnosti...), trhlinky, praskání.	Nesprávná struktura v rizikových místech (přechody pater, nerovnosti...), odstínově rozdílné mapy po zaschnutí.	Stopy stékající vody po zaschnutí, poškození struktury, vyplavení složek omítky.
Jak se bránit	Zakrývat lešení plachtou (pozor na přehřátý vzduch pod ní).	Proti větru neexistuje adekvátní ochrana.	Proti dešti lze zakrýt plachtou, proti déle působící vlhkosti není obrany.

2.2.4 Omítka ThermoUM Xtra

Tuto omítku vyrábí firma Satsys[®] Technology a. s. Jedná se o speciální termoizolační omítku, která je velmi vhodná pro omítání téměř všech druhů podkladů. Díky své nízké objemové hmotnosti a nízkému modulu pružnosti dovede omítka eliminovat objemové změny podkladu a tím omezit vznik případných trhlin. Ve srovnání s ostatními omítkami na našem trhu je 4x lehčí. Pro výrobnou hodnotu součinitele tepelné vodivosti se řadí mezi mimořádné tepelně-izolační omítky. Omítka je hydrofobizovaná a zároveň difúzně otevřená. To znamená, že odolává povětrnostním vlivům a zároveň umožňuje podkladu dýchat. Omítka ThermoUM Xtra je díky vysoké alkalitě také odolná proti růstu plísní, řas a dalších mikroorganismů na povrchu omítky.

Omítka je mimo jiné používána i pro restaurování historických krušnohorských hrázděných domků. Pro zlepšení mechanických vlastností těchto omítek je možné do jejich struktury zabudovat vlákennou výztuž. Jelikož se jedná o památkově chráněné stavby, je nutné zvolit vlákennou výztuž tak, aby byla v souladu s požadavky památkářů.

2.3 Vlákná pro kompozitní materiály

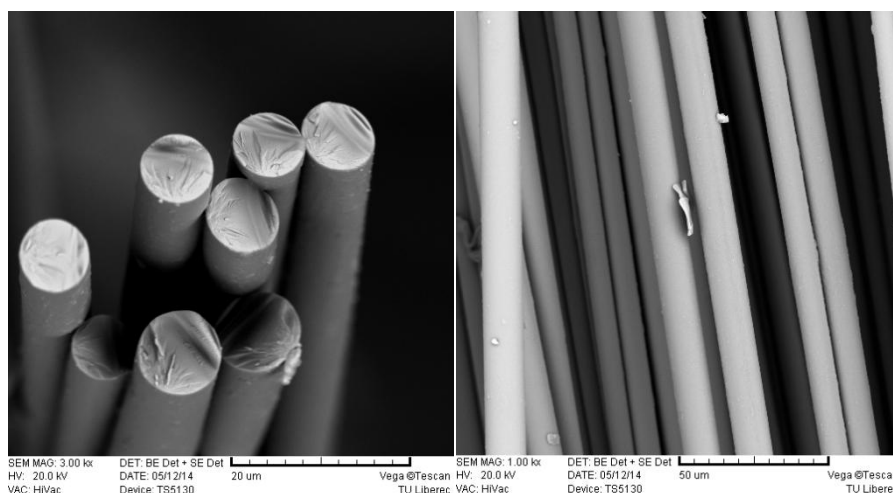
Jako výztuž se do kompozitních materiálů používá celá řada vláken. Největší zastoupení mají vlákna skleněná, uhlíková a aramidová. Dále se pak můžeme setkat s vlákny čedičovými, keramickými nebo polypropylénovými. Ve stavebnictví bývají využita i vlákna přírodního původu. Jsou to většinou lýková vlákna a také odpad vznikající při jejich zpracování, konopné pazdeří.

Pro vyztužení omítky ThermoUM Xtra byla přednostně pro své dobré vlastnosti vybrána skleněná a čedičová vlákna. Je možné použít i vlákna konopná. Zde je však problém s cenou, která by způsobila růst nákladů na výrobu takového omítky. Ve stavebním průmyslu se pro vyztužování používá konopné pazdeří, které je však pro tento pokus nevhodné. Nejsme u něj schopni naměřit potřebné vstupní parametry nutné pro výpočet kritické délky vláken ani tuto délku zajistit.

Při výběru vláken je nutné brát ohled na jejich mechanické vlastnosti (pevnost, počáteční modul, odolnost v ohybu aj.), na schopnost odolávat zásaditému prostředí, které se v omítce nachází, a také na jejich ekologickou závadnost. Omítky používané pro restaurování historických objektů musí také splňovat požadavky památkového úřadu na použitý materiál.

2.3.1 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna se řadí mezi anorganická vlákna. Jedná se o textilní prvek, který se získává s roztavené čedičové horniny. Základním materiálem pro získání těchto vláken je čedič, jinak zvaný basalt. Čedič je hornina mající šedočernou až černou barvu. Velké části zemské kůry jsou tvořeny právě čedičem a je obsažen i v sopečném magmatu. Z chemického hlediska se jedná o křemičito-železnato-vápenato-hořečnato-hlinito-sodnou horninu. Čedičové horniny pro výrobu vláken obsahují nefelín a olivín. Nejnižší požadované procento pro vlákenné zpracování je 46 % oxidu křemičitého (SiO_2), které se nachází v kyselých čedičích. Dále pak existují čediče zásadité s obsahem mezi 43-46 % oxidu a zásadité obsahující oxid křemičitý do 42 %. [5]



Obr. 2.4: Pohled na čedičová vlákna v rastrovacím elektronovém mikroskopu

2.3.1.1 Výroba čedičových vláken

K prvním pokusům zvlákňování čediče došlo na začátku 20. století. K dalšímu rozvoji a vylepšování však došlo až po druhé světové válce. Výrobní technologie je založena na zvlákňování z taveniny při 1500 °C až 1700 °C. Při rychlém zchlazení taveniny vzniká viskózní sklovitá hmota, při pomalém se vytvoří krystalické směsi obsažených minerálů. Vhodné vlákno však může vznikat i při dloužení za teploty 1300 °C. [5]

2.3.1.1.1 Nekonečná vlákna

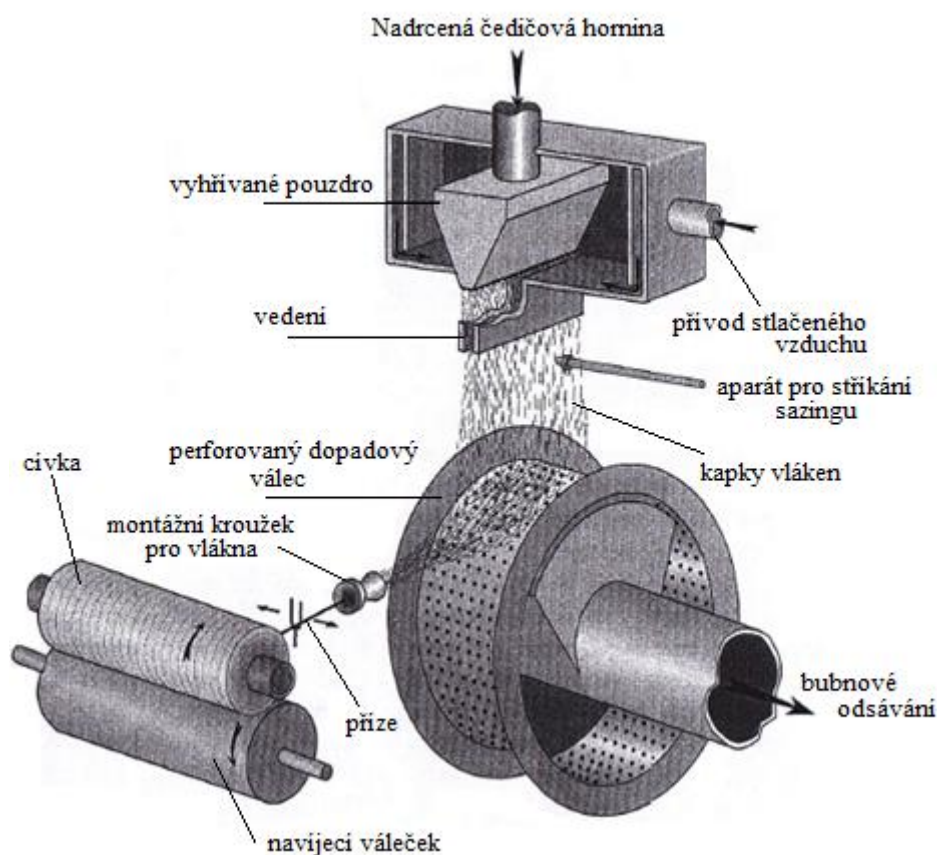
Čedičová vlákna se vyrábí buď kontinuální, nebo krátká s určitou délkou. Výroba nekonečných vláken se dá přirovnat k výrobě skleněných vláken. Hornina je roztavena v peci a proud taveniny je pod vysokým tlakem protlačován tryskami vyrobenými nejčastěji z platiny, které mají průměr kolem 1 mm. Tyto trysky jsou umístěny na dně zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna, který mimo jiné dává i jeho určité vlastnosti, závisí na rozdílu rychlostí vtékané suroviny a rychlostí odtahu. Odtah se provádí rychlostí až několik tisíc metrů za minutu. [5]

2.3.1.1.2 Krátká vlákna

Při výrobě krátkých vláken se používá multirolování, centrifugální ofukování nebo tuhnutí při vyfukování. Vlákna se vyrábí ze směsi složené z cca 75-82 % čediče a 20-25 % strusky. Tato směs se roztaví v peci při teplotě 1350-1450 °C. Tavenina vytéká z pece na rotující válec, kde jsou kapičky taveniny pomocí odstředivé síly a pomocí proudu vzduchu přetvořeny na jemné vlákno (obr. 2.5).

Pokud nejsou některé kapičky taveniny dostatečně horké, nemohou se protáhnout a odlétávají v podobě malých zrněk pryč. Tato zrnka jsou pod válcem zachycena a převedena zpět do pece, kde se roztaví spolu s další várkou horniny. Vytvořená jemná vlákna jsou unášena proudem vzduchu do usazovací komory. V komoře se vlákna ustalují do vrstvy připomínající pás, ve kterém pak pokračují do vytvrzovací komory. K vytvrzování dochází pomocí naneseného pojiva a především tepla. Při působení tepla dochází k odpařování vody z vláken a k polykondenzaci pojiva. Vytvrzovací teplota se pohybuje okolo 180-220 °C. Tímto způsobem vznikají rouna vytvořená z krátkých vláken, která jsou dále upravována na požadovaný rozměr, tvar a tloušťku. Většinou se používají jako izolace trubek, podlah, střeš aj.

Krátká samostatná vlákna jsou vyráběná trháním nebo sekáním z nekonečných vláken vyrobených kontinuálním způsobem nebo pomocí protlačování taveniny tryskou a následnému odtrhávání proudem vzduchu. [5]



Obr. 2. 5: Výrobní schéma krátkých čedičových vláken [1]

2.3.1.2 Vlastnosti čedičových vláken

- ✓ vysoký tepelný rozsah použitelnosti
- ✓ nehořlavost a nízký obsah spalin
- ✓ dobrá odolnost vůči vodě, většině alkálií, organickým kyselinám, anorganickým rozpouštědlům, většině chemikálií a jiným agresivním látkám
- ✓ nízká tepelná vodivost
- ✓ vysoký elektrický odpor
- ✓ odolnost proti eroznímu prostředí
- ✓ odolnost vůči UV záření
- ✓ odolnost proti plísním a jiným mikroorganismům [14]

Tab. 2.3: Fyzikální vlastnosti čedičových vláken

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Navlhavost	0,5	[%]
Hustota (při 20°C)	2 900	[kg·m ⁻³]
Počáteční modul pružnosti v tahu	100 000	[MPa]
Pevnost v tahu	1 850 – 2 150	[MPa]
Pevnost v tlaku	300	[MPa]

Proběhly mnohé studie, které zatím prokazují, že čedičová vlákna jsou pro člověka zdravotně nezávadná. Pouze při mechanickém narušení vláken je možné, že si člověk podráždí pokožku. K samovolnému uvolňování škodlivých látek u čedičových vláken nedochází. Materiály z těchto vláken jsou většinou doporučeny k technickému využití.

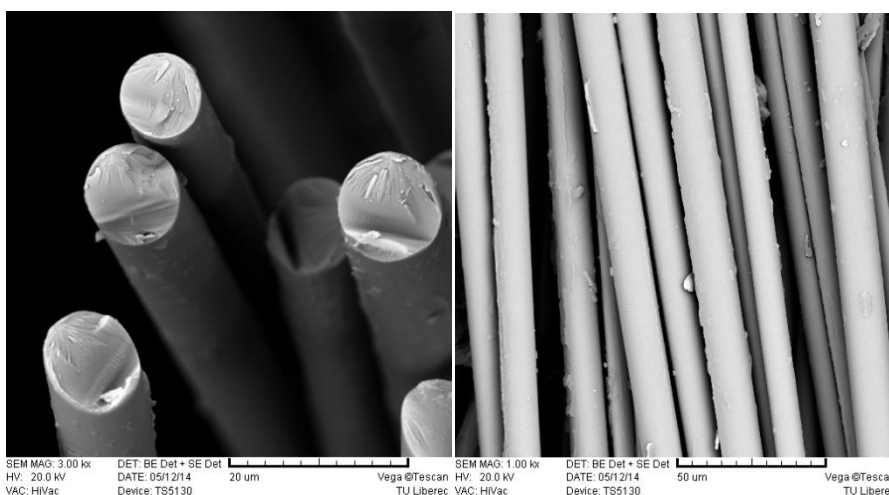
2.3.1.3 Použití čedičových vláken

Čedičová vlákna v posledních letech zaznamenala nárůst použití v mnoha odvětvích díky svým mechanickým, chemickým i tepelně-izolačním vlastnostem. Čedičová vlákna často nahrazují vlákna skleněná.

- ✓ tepelně-izolační materiály ve stavebnictví
- ✓ geotextilie pro silniční a železniční stavitelství
- ✓ výztuže do kompozitů
- ✓ tepelné, zvukové a chemické izolace
- ✓ filtrace agresivních látek
- ✓ ochranné pracovní oděvy (např. hasičské...) [5]

2.3.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se také řadí mezi vlákna anorganická. Jedná se o jeden ze sklářských výrobků, které nachází stále větší uplatnění v průmyslu i v běžném životě člověka. Výhodou skelných vláken oproti masivnímu sklu je především jejich vyšší pevnost v tahu a jsou tak vhodné pro kompozitní materiály. Tato vlákna jsou jedním z tradičních českých výrobků a vyrábí se ve formě nekonečných vláken a vláken střížových.



Obr. 2.6: Pohled na skleněná vlákna v rastrovacím elektronovém mikroskopu

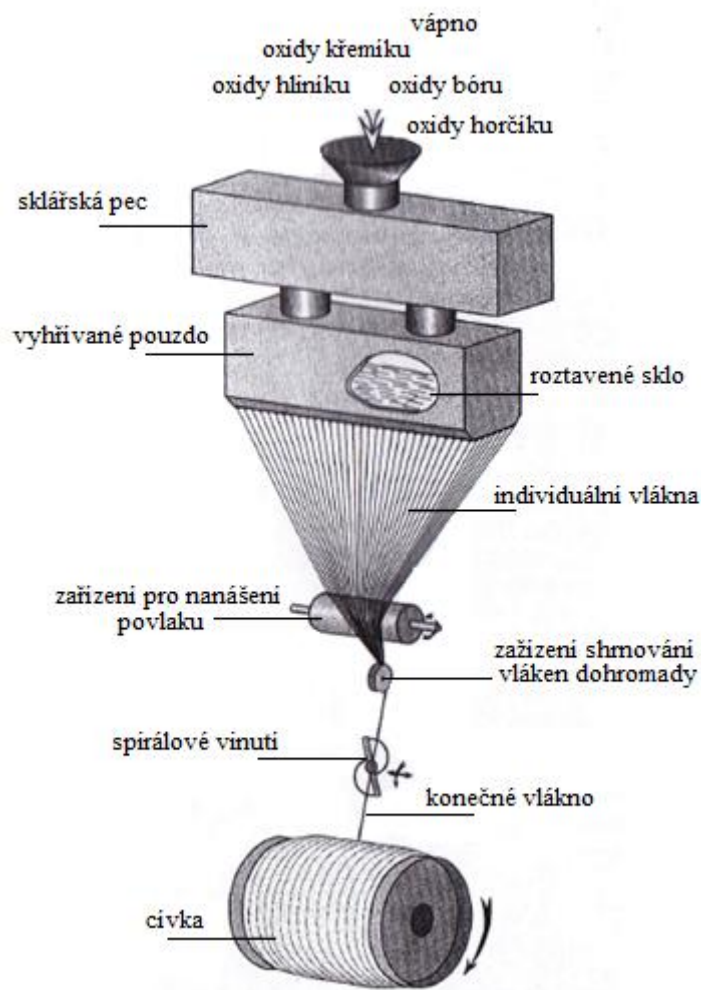
2.3.2.1 Technologie výroby

Skelná vlákna jsou vyráběna z taveniny určitého typu skla. Typy skel jsou různé podle jejich chemického složení. Máme například E-sklo, ECR-sklo, S-sklo, C-sklo. Sklo je vyráběno z oxidu křemičitého (SiO_2), oxidu vápenatého (CaO), oxidu hlinitého (Al_2O_3), oxidu hořečnatého (MgO) a dalších složek. Největší podílové zastoupení má ve výrobní směsi oxid křemičitý a oxid vápenatý. Podle obsahu jednotlivých složek ve směsi se také určují vlastnosti výsledného vlákna. C-sklo má například vynikající odolnost proti chemikáliím, E-sklo se používá jako elektroizolace a S-sklo je schopné snášet teploty přes 1000 °C a je méně pružné než ostatní typy. Skleněná vlákna se nejčastěji vyrábí metodou zvanou sol/gel. Z připravené disperze jednotlivých složek (solu) se postupným tékáním stává gel. Gel je v podstatě kapalina tak viskózní, že se v určitých situacích chová jako pevná látka. Tepelným zpracováním tohoto gelu se tvoří kompaktní látka, která je následně dloužena a ochlazována, čímž se tvoří skleněné vlákno. [6]

2.3.2.1.1 Nekonečná vlákna

Výroba nekonečných vláken je kontinuální proces, který probíhá ve sklářských agregátech (sklářských vanách). Vana je uzavřený prostor, který se vytápí na teploty, při které se sklářský kmen taví a dochází k jeho homogenizaci. Sklářský kmen je směs jednotlivých surovin v poměru, jež určuje typ a vlastnosti skleněného vlákna. Přísady jsou sklářský písek, kaolin, vápenec, kolemanit, kazivec a další. Skelná tavenina se přelévá z vany do platinových pícek, které mají dno s tryskami. Tavenina má tendenci vystupovat těmito tryskami ven. Samovolně protékající kapky jsou zachyceny a navedeny na navíječku, které je konstantní rychlostí protáhne na vlákna o požadovaném průměru.

Při kapání se pod píckou nanáší na vlákno lubrikant, který spojí pramen vláken dohromady, ale především mu dodá vlastnosti důležité pro další zpracování a určení použití. [1]



Obr. 2.7: Schéma sklářského kontinuálního stroje [1]

2.3.2.1.2 Další metody zvlákňování

- ✓ **Zvlákňování přes trysky** – již zmíněné zvlákňování přes trysky, kdy se tavenina odvíjí rychlostí 30-60 metrů za minutu a následně tuhne. Jednotlivé filameny o jemnostech 4 – 13 μm se spojují do výsledného vláknenného svazku, lubrikují a navíjí. Takto se vyrábí až 90 % skleněných vláken.
- ✓ **Dvoufázová technologie** – používá se pro staplová vlákna. V první fázi se z taveniny zhotovují tzv. pelety (pelety jsou něco jako skleněné granulky nebo brikety). V této formě je lze i skladovat. Ve druhé fázi jsou pelety roztaveny a zvlákňovány přes trysky pomocí síťového bubnu, který se otáčí rychlostí 60 m/s.
- ✓ **Foukání přes trysku** – odtah taveniny se od trysky provádí stlačeným vzduchem. Vláknena rozdílných délek se odtahují rychlostí 150-200 m/s. Pak se ukládají na síťový buben, odkud se materiál odtahuje, prochází olejovou mlhovinou a navíjí se na konečnou cívku.
- ✓ **Tažení tyčí** – jedná se o postup, při kterém se používá 100-200 nebo 150-190 dlouhých skleněných tyčí majících průměr 4 – 3 mm. Na dolním konci dochází vlivem tepla k jejich tavení. Odlétávající kapky se protahují ve vlákna, a dopadají na rotující buben, který je navíjí, zatímco se ochlazují.

Staplové příze se ještě dopřádají na rotorových nebo frikčních dopřádacích strojích. Prstencové stroje jsou pro tento účel díky své konstrukci nevhodné. [1] [7]

2.3.2.2 Produkty vyráběné ze skleněných vláken

- a) Sekaná vlákna – vykazují výbornou slučitelnost s matricí – používá se do kompozitů. Běžný průměr sekaných vláken se pohybuje mezi 10-13 μm a délka od 3 do 12 mm.
- b) Přímý a asemblovaný roving – průměr těchto nekonečných multifilamentů se pohybuje od 13 do 24 μm .
- c) Skelné rohože, skelná rouna, rovinové tkaniny a skelné sendviče. [8]

2.3.2.3 Vlastnosti skleněných vláken

- ✓ vysoká pevnost
- ✓ vysoká hodnota počátečního modulu pevnosti v tahu
- ✓ odolnost vůči vysokým teplotám
- ✓ nehořlavost
- ✓ odolnost proti chemikáliím
- ✓ elektrická a optická vodivost
- ✓ tepelné a zvukové izolační vlastnosti

[14]

Tab. 2.4: Fyzikální vlastnosti skelných vláken

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Navlhavost	0,1	[%]
Hustota (při 20°C)	2 600	[kg·m ⁻³]
Počáteční modul pružnosti v tahu	70 000	[MPa]
Pevnost v tahu	1 850 – 2 150	[MPa]
Pevnost v tlaku	300	[MPa]

Díky svým vlastnostem jsou tato vlákna hojně používána do kompozitních materiálů jako výztuže. A to jako kontinuální vlákna nebo ve formě stříže. Konečné kompozitní výrobky se díky své vysoké odolnosti a relativně nízké hmotnosti využívají v automobilovém a leteckém průmyslu. Skleněná vlákna jsou vysoce odolné vůči chemikáliím. Této vlastnosti se využívá v chemickém průmyslu. Dále skleněná vlákna nachází uplatnění v elektrotechnickém průmyslu, kde se aplikují ve výrobě notebooků, počítačů a mobilních telefonů. Dále je možné je používat jako opticky vodivé kabely. [7]

2.3.3 Lýková vlákna

Lýková vlákna jsou všeobecně nazývaná vlákna, která jsou získávána ze stonků (lodyh) rostlin. Nejvíce používanými vlákny jsou len, konopí, juta a ramie. Dále je možné vyrábět i vlákna kopřivová, kenafová nebo klejchová. Všechna lýková vlákna jsou mnohobuněčná a jsou složena z řady elementárních vláken. [2]

2.3.3.1 Len

Lněná vlákna se získávají ze stonku lnu setého. Jedná se o jednoletou rostlinu, která se pěstuje nejen kvůli vláknům, ale také kvůli olejnatým semenům. Dorůstá výšky kolem 1,3 m, kvete modře a plodem je tobolka se semeny.

Typy lnu

- Len jarní – nepukavé tobolek
- Len přadný – dlouhý stonek
- Len olejní – nižší rozvětvená forma
- Len olejnopřadný

Pro výrobu textilních vláken se používá len přadný a to zejména kvůli dlouhému stonku, který obsahuje více delších vláken než ostatní typy. Stonek surového lnu je tvořený jednotlivými vlákny dlouhými 20-50 mm, která jsou slepená pektinem a tvoří svazek o délce 50 až 90 cm. Řez lněným vláknem má tvar pětihranu, uprostřed je lumen. Len, stejně jako ostatní lýková vlákna, je typický kolénky, které se tvoří v průběhu růstu rostliny. Kolénka blízko u sebe značí, že rostlina měla špatné podmínky pro růst. [2]

2.3.3.2 Zpracování lnu

Lněná vlákna se nejprve oddělí od zdřevnatělého stonku. Nejprve přichází na řadu trhání, máčení nebo rosení, zbavení semen a lámání stonků, potírání a nakonec vochlování. Lámání a potírání se provádí v tírnách. Dojde k počesání a urovnání svazků kalandrování (lámání) – uvolnění dřevoviny potěrání – odstranění dřevoviny. Dále jdou vlákna do vochlovny, kde jsou pročešávána na speciálních vochlovacích strojích. Výsledným produktem jsou ojednocená lněná vlákna a koudel, pazdeří a odpady.

Speciální úpravou lněných vláken je kotonizace. Jedná se o proces rozrušování pektinové vazby mezi vlákny. Kotonizace je mechanická, chemická, biologická nebo enzymatická. Při mechanické kotonizaci se na vlákna působí různými čechradly, která vazby naruší. K chemické kotonizaci se používají alkálie za tepla nebo pára pod tlakem. Biologická kotonizace využívá k narušení vazeb bakterie a enzymatická pektinázy. [4]

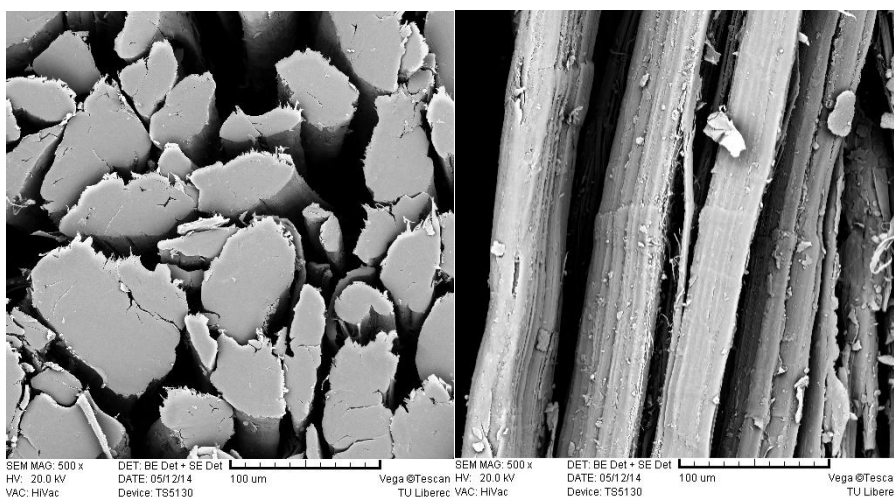
2.3.3.3 Vlastnosti lněných vláken

Délka elementárních vláken se pohybuje od 17 do 20 mm, průměr vláken okolo 12-17 μm . Technická vlákna mají délku cca 60 - 80 cm. Jednou z nejvyužívanějších vlastností lnu je jeho rostoucí pevnost se zvyšující se vlhkostí. Pevnost za mokra se zvyšuje až o 20 %. Vlákna jsou málo tažná. Lněná vlákna také dokážou odolat

působení slané i sladké vody. Mají výbornou tepelnou vodivost, zachovávají si studený omak. Má vysokou navlhavost, uzačnní vlhkost je až 12 %. Nevýhodou u tkanin je však jeho silná mačkavost. [2]

2.3.3.4 Konopí

Konopná vlákna se získávají z konopí setého severního, jižního nebo středoruského. Morfologie konopného vlákna je obdobná jako u vlákna lněného. Konopí má však vlákna tmavší, hrubší a pevnější než len. Konce elementárních vláken jsou tupé a rozeklané, technické vlákno je delší než lněné a po délce je pruhované. Konopné vlákno má širší lumen a hrany řezu vlákna jsou zaoblené. Zpracování konopí je velmi podobné jako u získávání lněných vláken ze lnu. Základním rozdílem mezi lněnými a konopnými vlákny je sklon fibril. U lnu mají vlákna sklon S, konopná mají sklon Z.



Obr. 2. 8: Pohled na konopná vlákna v rastrovacím elektronovém mikroskopu

2.3.3.5 Vlastnosti konopných vláken

- ✓ odolnost vůči UV záření
- ✓ dobré tepelně-izolační vlastnosti
- ✓ vysoká pevnost
- ✓ vysoká savost
- ✓ antistatické
- ✓ vysoká odolnost vůči teple

3 Experimentální část

Cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv má přítomnost vlákenné výztuže v omítce na mechanické vlastnosti omítkového kompozitu. V experimentální části je zaznamenán postup získávání potřebných vstupních parametrů, tvorba vzorků a průběh zkoušek mechanických vlastností výsledného omítkového kompozitu.

3.1 Vstupní parametry vláken

Pro vytvoření kompozitního zkušební vzorku potřebujeme znát kritickou délku vlákenné výztuže a směsový podíl výztuže a matrice. K těmto výpočtům je nutné znát pevnost vláken F_v [N], průměr vláken d [mm], soudržnost vláken s matricí τ_m [N/mm²] a hustotu vláken ρ_v [kg/m³].

3.1.1 Pevnost vláken

Pevnost vláken je odezva vláken na namáhání v tahu. Tedy jakou silou můžeme namáhat vlákno, než dojde k přetržení.

3.1.1.1 Průběh zkoušky pevnosti vláken

Měření pevnosti bylo provedeno na dynamometru LabTest 2.010 dle ČSN EN ISO 5079. Upínací délka vzorků byla 50 mm, rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 100 mm/min. Vzhledem k faktu, že jednotlivá čedičová a skleněná vlákna jsou velmi jemná a křehká, byly pro upevnění použity papírové rámečky. Aby mohl software správně vyhodnotit výsledky zkoušky, byl u každého vlákna změřen jeho průměr na Lanametu. Zjištěný průměr sloužil programu pro výpočet plochy trhaného vlákna. Statisticky zpracované výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3.1. Všechny výsledky zkoušek jsou v příloze č. 2 na přiloženém CD.

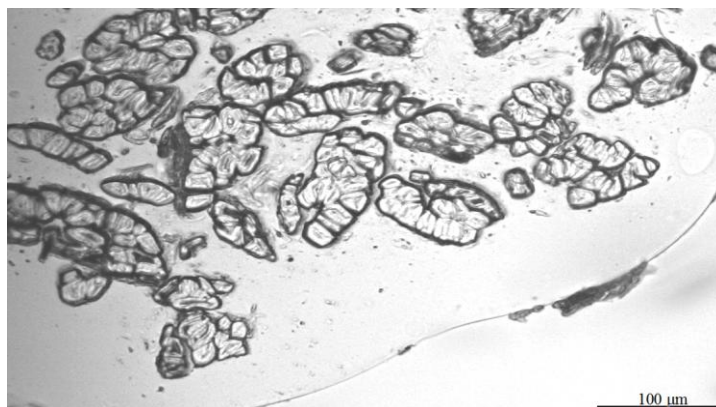
Tab. 3.1: Parametry skleněných, čedičových a konopných vláken

	Skleněná vlákna	Čedičová vlákna	Konopná vlákna
Pevnost vláken [N]	0,25	0,16	10,31
Počáteční tangentový modul [MPa]	$104,07 \cdot 10^3$	$86,12 \cdot 10^3$	673,38
Průměr vláken [μm]	12	9,6	1740

3.1.2 Průměr vláken

Průměr je jednou ze základních charakteristik vlákna. U kruhových vláken lze průměr zjistit snadno, u vláken s nepravidelným tvarem určujeme ekvivalentní průměr z plochy příčného řezu vlákna.

Průměry kruhových vláken lze naměřit na přístroji zvaném *Lanametr*. Před měřením pevnosti vláken byla vlákna v rámečcích přeměřena na *Lanametru*. Vlákná jsou promítána na matnici s otočnou stupnicí. Z této stupnice se odečte průměr měřených vláken. Byl použit objektiv zvětšující 20x, takže jeden dílek odpovídá hodnotě 2 μm. V případě konopných vláken, u kterých je průřez nekruhový, je nutné použít jiný způsob měření. Z vláken byly vytvořeny příčné řezy pomocí mikrotomu. Tyto řezy byly analyzovány pomocí obrazové analýzy Lucia G. Z obrazové analýzy je zřejmé (obr. 3.1), že při přípravě řezů došlo k rozvolnění vláknenných svazků a není tedy možné určit, která vlákna patří danému svazku.



Obr. 3.1: Řez svazkem konopných vláken pod mikroskopem

Ke stanovení průměrů konopných svazků bylo využito výpočtu (1). Pomocí vzorce se vypočte ekvivalentní průměr, který vychází z kruhové plochy a z jemnosti:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot T}{\pi \cdot \rho}} \quad (1)$$

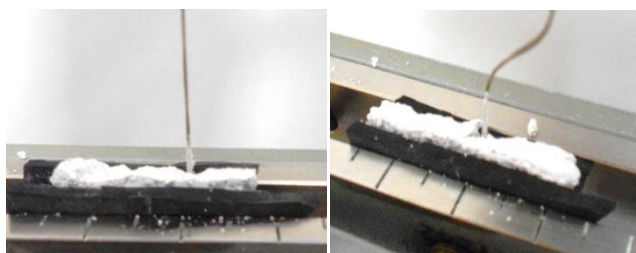
kde d [mm] je průměr vláknenného svazku, T [tex] je jemnost svazku a ρ [mm] je hustota konopných vláken. Pro zjištění jemnosti konopných vláken byla zvolena gravimetrická metoda. Průměrné hodnoty průměrů jednotlivých druhů vláken jsou uvedeny v tabulce č. 3.1. Všechny výsledky měření a výpočtů jsou k nahlédnutí v příloze č. 2 na přiloženém CD.

3.1.3 Soudržnost vláken s matricí

Soudržnost vláken s matricí je důležitá nejen pro stanovení kritické délky vlákna, ale souvisí také s trvanlivostí a odolností omítkového kompozitu. Soudržnost vláken a matrice zajišťuje vytvoření kompaktní hmoty. Čím více matrice k vláknům přilne, tím lépe odolá namáhání a zamezí šíření trhlin.

3.1.3.1 Průběh zkoušky soudržnosti vláken s matricí

Soudržnost vláken s matricí byla měřena na přístroji LabTest 2.010. Upínací délka 50 mm, rychlost posuvu čelistí 6,0 mm/min. V dolní horizontální čelisti byl upnut vzorek omítky, ze kterého vyčnívala vlákna. Ta byla zachycena do horní vertikální posuvné čelisti. Čelist se konstantní rychlostí posouvala, dokud nenastal pokles pevnosti o 90 %. Z důvodu velké jemnosti a křehkosti jednotlivých vláken byla soudržnost měřena na jejich svazcích. Při měření soudržnosti čedičových vláken s matricí se vlákna vysouvala bez většího poškození omítky a docházelo k prokluzu mezi vlákny a omítkou. Vytrhávání skleněných a konopných vláken bylo doprovázeno praskáním omítky, což ukazuje, že omítky se více váže na jejich strukturu. Tento fakt je ovlivněn především chováním vláken v alkalickém prostředí a strukturou jejich povrchu. Struktura povrchu skleněných vláken je alkalickým prostředím mírně narušena, čímž je způsobeno lepší spojení vláken s matricí. Z toho důvodu docházelo při namáhání k praskání omítky – vlákna byla s omítkou pevněji spojena. Čedičová vlákna jsou vůči alkalickému prostředí netečná. Nedochází tedy k tak dobrému spojení, proto při zkouškách vlákna z omítky vykluzovala bez jejího poškození. Soudržnost konopných vláken a matrice je dána především povrchem konopných vláken. Vlákna nejsou hladká a umožňují lepší přilnutí k matrici. Průběh zkoušky soudržnosti čedičového vlákna je zachycen na obrázku 3.2. Průměrné výsledky soudržnosti vláken a matrice jsou uvedeny v tabulce 3.2, všechny výsledky jsou k nahlédnutí v příloze č. 2 na přiloženém CD.



Obr. 3.2: Průběh zkoušky soudržnosti čedičových vláken s matricí

Tab. 3.2: Soudržnost vlákna s matricí

	Skleněná	Čedičová	Konopná
Jemnost svazku [tex]	89,4	104,05	79,0
Plocha vláken [mm ²]	0,036	0,039	0,052
Soudržnost vláken s matricí [MPa]	290,7	194,6	189,4
Jemnost vlákna [tex]	0,289	0,264	-
Počet vláken [-]	309	394	-
Soudržnost vlákna s matricí [MPa]	1,06	0,47	-

3.1.4 Objemová hmotnost vláken

Hustota jednotlivých druhů vláken byla stanovena pomocí pyknometrické metody. Pyknometr je skleněná baňka určitého objemu se zbroušenou zátkou s kapilárou. Objem vláken změříme pomocí trojího vážení. Nejprve naplníme pyknometr destilovanou vodou, osušíme a zvážíme (hmotnost m_1). Poté vážením zjistíme hmotnost pyknometru a vedle umístěných vláken m_2 . Nakonec se vlákna vloží do pyknometru a provede se zvážením (hmotnost m_3). [15]

Hmotnost vláken pak je:

$$m = m_2 - m_1$$

Hmotnost kapaliny vytlačené z pyknometru je: $m_k = m_2 - m_3$

Odtud hustota vláken:

$$\rho_v = \frac{m}{m_k} \cdot (\rho_k - \sigma) + \sigma \quad (2)$$

kde ρ_v [kg/m³] je objemová hmotnost vláken, m [kg] je hmotnost vláken, m_k [kg] je hmotnost vytlačené kapaliny, ρ_k [kg/m³] hustota kapaliny a σ [kg/m³] je hustota vzduchu.

Výsledky měření hustoty jsou v tabulce 3.3.

Tab. 3.3: Hustoty vláken

	Skleněná vlákna	Čedičová vlákna	Konopná vlákna
Hustota [kg/m ³]	2500	2650	1510

3.2 Vstupní parametry omítky

Ke stanovení kritické délky vláken a směsového poměru je nutné zajistit i vstupní parametry omítky. Jedná zejména o modul pružnosti v ohybu E [N/mm²] a hustotu ρ_o [kg/m³] omítky.

3.2.1 Modul pružnosti omítky

K zjištění pevnosti omítky a jejího modulu pružnosti byl použit dynamometr TIRA Test 2300 uzpůsobený pro trojbodý ohyb. Sypká omítka se smísila s vodou ve stanoveném poměru a byla vymíchána kompaktní směs, ze které byly vytvořeny zkušební vzorky o rozměrech 15 x 10 x 100 mm. Měření proběhlo po důkladném proschnutí směsi v laboratorních podmínkách. Detailní postup zkoušky je stejný jako v kapitole 3.5.2. Průměrné výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3.4, všechny výsledky měření jsou uvedeny v příloze č. 2 na přiloženém CD.

Tab. 3.4: Průměrné parametry omítky

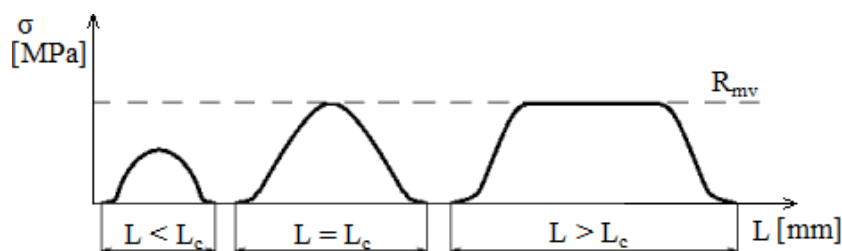
Pevnost omítky [N]	9,42
Modul pružnosti omítky [MPa]	57,62

3.2.2 Objemová hmotnost omítky

Hustota omítky byla nejdříve měřena pomocí pyknometrické metody. Vzhledem k tomu, že má nižší hustotu než voda, nebylo možné tuto metodu provést. Ze vzorku omítky dodaného firmou byl uříznut hranolek o rozměrech 20 x 10 x 43 mm. Následně byla změřena jeho hmotnost na laboratorních vahách; $m = 5,4156 \text{ g}$. Pomocí vzorců $V_o = a \cdot b \cdot c$, $\rho_o = \frac{m}{V_o} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ byl spočten objem hranolku a následně hustota omítky. Hustota omítky $\rho_o = 551 \text{ kg/m}^3$.

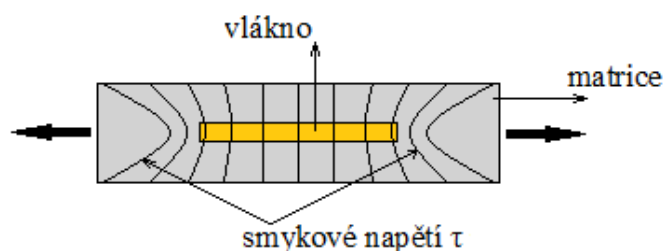
3.3 Kritická délka vláken

Jelikož u omítek není přednostní směr zatěžování, je vhodné použít vyztužení krátkými vlákny, které zlepšují mechanické vlastnosti ve všech směrech. Pro přenos zatížení mezi matricí a vláknem je důležitá délka vlákna. Jedná se o délku, která je schopná přenášet napětí, jež je způsobeno přenosem zatížení z matrice prostřednictvím smykového napětí, které působí na rozhraní vlákno – matrice. Kritická délka vlákna je jeho minimální délka, která je ještě schopna přenášet napětí. Pokud mají vyztužná vlákna menší délku než kritickou, neúčastní se na přenosu napětí a nemají tak v kompozitu žádný vliv. Minimální délku pro přenos napětí lze určit pomocí rovnováhy maximální síly, kterou je schopné vlákno přenášet a síly způsobené smykovým napětím podél vlákna. Na obrázku 3.3 je ilustrováno zatížení vlákna v matrici. Je z něj patrné, že napětí na koncích vláken je nulové a roste směrem ke středu vlákna. [16][17]



Obr. 3.3: Přenos napětí ve vlákne (σ...napětí, R_{mv} ...pevnost vlákna, L_c ... kritická délka)

Konce vláken se na přenosu nepodílejí, je zde však vysoká koncentrace smykového napětí (obrázek 3.4).



Obr. 3.4: Smykové napětí mezi vláknem a matricí

Při kritické délce vlákna je stejná pravděpodobnost přetrhu vlákna jako jeho vytržení z matrice. Pro kruhová vlákna lze kritickou délku l_c [mm] určit:

$$l_c = \frac{R_{mv} \cdot d}{2\tau_m} \cdot 10^6 \quad (3)$$

kde l_c [mm] je kritická délka vlákna, R_{mv} [N] pevnost vláken, d [mm] je průměr vláken a τ_m [Pa] pevnost rozhraní mezi matricí a vlákny ve smyku. [17]

Vypočtená kritická délka jednotlivých druhů vláken je uvedena v tabulce 3.5.

Tab. 3.5: Vypočtené hodnoty kritických a efektivních délek

	Skleněná vlákna	Čedičová vlákna	Konopná vlákna
Kritická délka l_c [mm]	0,00149	0,00161	0,04734
Efektivní délka l [mm]	0,02242	0,02415	0,71010

Jedná se však o kritickou, tedy minimální délku vlákna, které lze dosáhnout velmi obtížně. Byl tedy využit vzorec (4) pro výpočet efektivní délky vlákna od Williama D. Callistera: [16]

$$l = 15 \cdot l_c \quad (4)$$

Po přepočtu kritické délky na efektivní dostaneme hodnoty uvedené rovněž v tabulce 3.5. Tyto vzorce jsou však primárně sestaveny pro kompozity s polymerní matricí, kde se kritická délka výztuže pohybuje okolo 0,5 - 1 mm. Z důvodu zcela jiné matrice, a tedy i jiného mechanismu soudržnosti, je třeba výpočet pro efektivní délku ještě upravit, aby bylo možné zajistit vláknennou výztuž reálné délky.

Pro tuto úpravu je možné využít tvarového součinitele α (aspektní poměr). Krátkovláknenné kompozity jsou charakterizovány aspektním poměrem α . Jedná se o poměr mezi délkou vlákna a jeho průměrem l/d . Minimální aspektní poměr u krátkovláknenných kompozitů se nachází v rozmezí $\alpha = 50$ až 100. Obvykle se tvarový součinitel α pohybuje mezi 30 až 500. U krátkovláknenných kompozitů však není vyloučen ani vyšší poměr, může se pohybovat i v řádech tisíců. Tvarový součinitel dlouhovláknenných kompozitů se totiž blíží k nekonečnu.

Konečná délka vláknenné l_v [mm] výztuže (5) byla tedy určena jako efektivní délka násobená aspektním poměrem $\alpha = 300$.

$$l_v = l \cdot 300 \quad (5)$$

Konečné délky vláken jsou spolu s aspektními poměry uvedeny v tabulce 3.6.

Tab. 3.6: Konečné hodnoty vláknenné výztuže

	Skleněná vlákna	Čedičová vlákna	Konopná vlákna
Délka vláknenné výztuže l_v [mm]	6,7	7,3	213,0
Aspektní poměr l/d [-]	588	760	122

Po vyhodnocení vstupních parametrů vláken bylo zjištěno, že konopná vlákna jsou pro výpočet v tomto experimentu nevhodná. Komplikace vychází z podstaty konopných vláken. Pro zjišťování vstupních parametrů a přípravu kompozitních vzorků nelze použít elementární vlákna. Z tohoto důvodu byly použity svazky konopných vláken, které však mají příliš velký průměr. Kvůli velikosti průměru nelze aplikovat uvedený výpočet pro stanovení konečné délky vláknenné výztuže. Musel by být použit jiný aspektní poměr, což by nekorespondovalo s výpočty konečné délky skleněných a čedičových vláken. Hodnota konečné délky konopných vláken je nevhodná, protože vzorky omítkových kompozitů mají výšku h 10 mm, kterou délka konopných vláken převyšuje. Vlákna by tak neměla možnost uložit se kolmo k ose vzorku. Z výše popsaných důvodů, a také kvůli vyšší pořizovací ceně a špatné dostupnosti sekaných konopných vláken, byla konopná vlákna jako výztuž kompozitních omítek vyloučena. Pro vyztužení výsledného omítkového kompozitu budou tedy použita pouze skleněná a čedičová vlákna.

3.4 Výpočet směšovacího poměru výztuže a matrice

U betonových kompozitů, které se svým charakterem velmi blíží omítkám, dosahuje maximální obsah výztužných vláken hodnoty 6 %. Byl vyzkoušen tento poměr a bylo zjištěno, že pro dostupný druh omítky je příliš vysoký. Matrice se obtížně spojovala s vlákny. Na základě této zkušenosti byl stanoven obsah vlákenné výztuže pro omítku 1 %, 2 % a 3 %.

Ke stanovení směšovacího poměru byl zvolen hmotnostní podíl, který je pro tvorbu kompozitů vhodný. Tento výpočet vychází z procentuálního zastoupení složek v kompozitu a z jejich hustot: [14]

$$w_i = \frac{V_i \cdot \rho_i}{\sum V_i \rho_i} [\%] \quad (6)$$

kde w_i [%] hmotnostní podíl i-té složky, V_i [%] je objemový podíl i-té složky a ρ_i [kg/m³] je hustota i-té složky. Vypočtené hodnoty hmotnostních podílů jsou zaznamenány v tabulce 3.7.

Tab. 3.7: Hmotnostní podíly vlákenné složky

V_i [%]	w_i [%] skleněná vlákna	w_i [%] čedičová vlákna
1	4,38	4,63
2	8,48	8,94
3	12,31	12,95

Pro tvorbu 8 zkušebních vzorků o daných rozměrech bylo třeba zhruba 110 gramové směsi. Hmotnosti jednotlivých komponent pro výrobu 110 g směsi jsou uvedeny v tabulce č. 3.8.

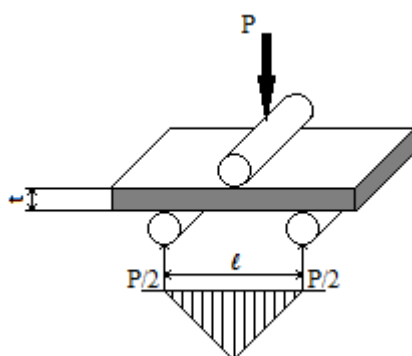
Tab. 3.8: Hmotnosti jednotlivých složek pro výrobu 110 g směsi

Obsah vláken [%]	Obsah skleněných vláken [g]	Obsah čedičových vláken [g]	Obsah omítky [g]	
1	4,84	5,06	105,16	104,94
2	9,35	9,79	100,65	100,21
3	13,53	14,30	96,47	95,70

3.5 Zkouška trojbodým ohybem

Zkouška trojbodým ohybem se provádí u materiálů, u kterých je předpoklad, že budou namáhány na ohyb. Jedná se o různé části staveb, jako jsou nosníky, střešní tašky, obkladový materiál či omítky. Díky zkoušce trojbodým ohybem lze také zjistit modul pružnosti materiálů, které nelze podrobit takové či tlakové zkoušce.

Při této zkoušce se vzorek položí jako nosník na dvě podpěry. Vzápětí se seshora působí na vzorek trnem, který se pohybuje směrem dolů konstantní rychlostí, dokud nedojde ke zlomení vzorku, nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Způsob uložení vzorku na podpěry je na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Schéma trojbodého ohybu

Před měřením je třeba zjistit a zadat do softwaru rozměry vzorku (výšku h , šířku b , délku l) a vzdálenost podpěr. Napětí v ohybu je vypočteno pomocí vzorce (7):

$$R_f = \frac{3 FL}{2bh^2} \quad (7)$$

kde R_f [MPa] je napětí v ohybu, F [N] je síla, L [mm] je vzdálenost podpěr, b [mm] šířka vzorku a h [mm] je výška vzorku. [19]

Dále pak modul pružnosti získaný z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, je softwarem počítán dle vzorce (8):

$$E = \frac{Fl^2}{4 Xbh^2} \quad (8)$$

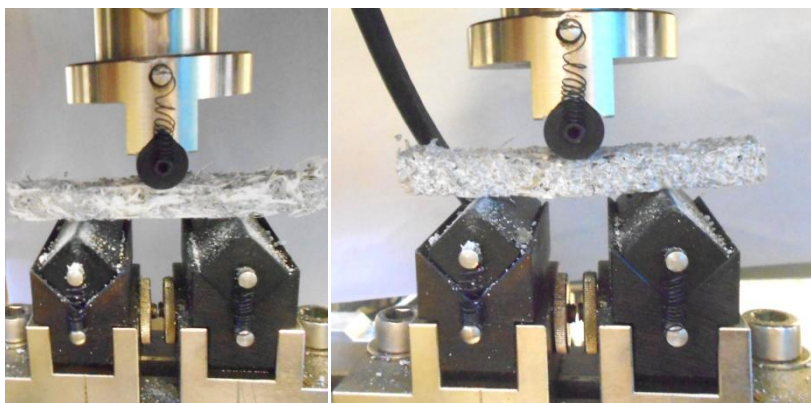
kde E [MPa] modul pružnosti v ohybu, F [N] je síla, l [mm] je délka vzorku, b [mm] šířka vzorku, X [mm] průhyb a h [mm] je výška vzorku. [19]

3.5.1 Příprava vzorků pro trojbodý ohyb

Pro zkušební vzorky běžných kompozitů z polymerních hmot se používají převážně rozměry 10 x 5 x 80 mm. U betonových směsí jsou to dle normy ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo* tyto rozměry: 40 x 40 x 160 mm. Tepelně-izolační omítky jsou běžně nanášeny ve vrstvě 5 – 25 mm. Vzorky musí mít takové rozměry, aby se vlákenná výztuž mohla orientovat všemi směry, tedy i kolmo. Rozměry vzorků byly na základě dostupných materiálů modifikovány pro potřeby laboratorního zkoušení omítkového kompozitu s ohledem na charakter výsledného kompozitu. Vzorky mají rozměry 15 x 10 x 100 mm (obr. 3. 6). Pro výrobu 8 vzorků bylo potřeba zhruba 110 g směsi. Hmotnost vlákenné výztuže a omítky pro jednotlivé procentuální podíly vyztužení jsou uvedeny v tabulce 3.8. Omítková směs byla míchána podle stavebních norem 2 minuty. Hotová směs byla nanesena do připravených formiček, kde tuhla a schla po dobu 28 dnů. Postup výroby vzorků byl v souladu s normou ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovní pevností zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*.

3.5.2 Průběh zkoušky

K provedení zkoušky trojbodého ohybu byl použit dynamometr TIRA test 2300 firmy LaborTech s čelistmi upravenými pro trojbodé ohýbání. Dynamometr byl připojen k počítači, který pomocí speciálního softwaru zaznamenával a vyhodnocoval zkoušky. U každého vzorku byly pomocí posuvného měřidla změřeny rozměry. Ty byly zadány do počítačového programu, který vyhodnocuje zkoušku. Dále byla změřena a zadána šířka podpěr. Ta byla u všech vzorků 50 mm. Po zadání vstupních parametrů byly vybrány měřené hodnoty. Jednalo se o napětí v ohybu R_f [MPa] a modul pružnosti E [N/mm²]. Dále byla nastavena rychlost posuvu trnu a podmínka ukončení zkoušky. Po nastavení všech základních údajů byl na podpěry umístěn vzorek a to tak, aby ležel na obou podpěrách, střed vzorku byl přesně ve středu mezi podpěrami a hrot se vzorku dotýkal. Před zahájením samotné zkoušky byla vynulována dráha a síla. Poté započalo samotné měření. Síla působila, dokud průhyb vzorku nedosáhl hodnoty 5 mm. Po dosažení zastavovací podmínky byla zkouška ukončena a horní čelist navrácena do výchozí pozice.



Obr. 3.6: Průběh zkoušky trojbodého ohybu

3.6 Charpy test

Charpy test je zkouška rázové a vrubové houževnatosti materiálů. Spočívá v namáhání tělesa rázem, tedy silou koncentrovanou do krátké doby. Rázová houževnatost souvisí se schopností materiálu rychle absorbovat energii, tedy schopnost deformovat se určitou rychlostí. Na rozdíl od statického namáhání v ohybu, kdy dojde k porušení tělesa až při extrémním průhybu, tak s rychlostí namáhání se stávají materiály křehčími, což se projeví porušením vzorku už při malém průhybu. Je to dáno tím, že některé rovnovážné pochody v materiálu nemají dostatek času k realizaci. Porušení, které se při malých rychlostech namáhání jeví jako tažné, ale je křehké. [18]

Rázová houževnatost je definována jako kinetická energie kyvadlového rázu kladiva nutná k přeražení zkušebního tělesa vztažená na původní plochu příčného řezu vzorku (9):

$$A_n = \frac{W}{b \cdot h} \text{ [J/mm}^2\text{]} \quad (9)$$

kde W [J] deformační energie spotřebovaná k přeražení vzorku, b [mm] šířka vzorku a h [mm] je výška vzorku. [19]

3.6.1 Příprava vzorků pro Charpyho test

Pro testování rázové houževnatosti byly použity vzorky stejných rozměrů jako u trojbodého ohýbání, tedy 15 x 10 x 100 mm. K výrobě omítkové kompozitní směsi byly použity směšovací poměry uvedeny v kapitole 3.4. Příprava a schnutí vzorků byla v souladu s normou ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovni pevností zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*.

3.6.2 Průběh zkoušky

Zkouška rázové houževnatosti byla prováděna na Charpyho kladivu Rasil 5.5 firmy CEAST. Zkoušení rázové houževnatosti probíhalo na katedře Tváření kovů a plastů fakulty strojní. Katedra Materiálového inženýrství nedisponuje kladivem, vyvíjejícím dostatečně malou rázovou energii, která je potřebná pro přeražení vzorků. Bylo použito kuželové kladivo, které se pohybuje po kruhové dráze. Bylo vybráno takové, aby se naměřené hodnoty pohybovaly mezi 10 % a 80 % rozsahu měřicí stupnice. Vzdálenost podpěr byla nastavena 62 mm a rychlost pádu kladiva $2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V prvním kroku se kladivo zvedlo do horní výchozí polohy, kde se upevnilo zarážkou. Na podpěry se umístil vzorek tak, aby se jeho střed kryl se středem mezi podpěrami. Po připravení vzorku se uvolnila zarážka a kladivo se pohybovalo volným pádem do dolní polohy, kde přerazilo vzorek kompozitu. Po provedení zkoušky se kladivo vrátilo do výchozí polohy a z displeje byla odečtena a zaznamenána energie potřebná k přeražení kompozitu. Výsledná energie byla pomocí výpočtu (8) převedena na rázovou houževnatost.



Obr. 3.7: CEAST Resil 5.5

3.7 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je zatížení vzorku na mez pevnosti vztažené na jeho původní plochu. Při takovéto zkoušce síla působí v ose vzorku. Provádí se u křehkých materiálů namáhaných na tlak. Jedná se o litiny, ložiskové kovy a stavební materiály, jako jsou cihly, betony, omítky a kámen. Tlaková zkouška se provádí do porušení materiálu, nebo dokud není dosažena určená výška vzorku. Z podstaty zkoušky vyplývá, že dojde ke zmenšení výšky vzorku a ke zvětšení plochy jeho příčného řezu.

3.7.1 Příprava vzorků pro měření pevnosti v tlaku

Vzorky pro pevnost v tlaku byly připravovány podle stejného postupu jako u předchozích zkoušek. Byla namíchána omítková směs ve stejných poměrech, jaké jsou uvedeny 3.4. Pro tlakovou zkoušku byly vytvořeny vzorky s kulatým průřezem. Výška vzorku $h = 20$ [mm], průměr vzorku $d = 46$ [mm]. Plocha příčného řezu vzorku $A = 1662$ [mm²]. Bylo vytvořeno 7 sad vzorků s poměry vlákenné výztuže 0 %, 1 %, 2 % a 3 % u obou druhů výztuže (skleněná i čedičová vlákna). Každá sada čítala 5 vzorků. Po vyschnutí vzorků byl posuvným měřidlem přeměřen průměr a výška. Případné nerovnosti vzniklé nanášením nebo strukturou omítky byly zahlazeny jemným smirkovým papírem. Opět následovalo měření vzorků a zápis zjištěných hodnot.

3.7.2 Postup zkoušky

K provedení zkoušky pevnosti v tlaku byl zvolen dynamometr TIRA test 2300 napojený k počítači s vyhodnocovacím softwarem. Přístroj byl opatřen čelistmi uzpůsobenými pro tlakové namáhání. Před měřením se do programu zanesly hodnoty, které potřebujeme zjistit. Síla při stlačení o 1 mm F_1 [N], síla při stlačení o 2 mm F_2 [N] a síla při stlačení o 5 mm F_3 [N]. Hodnota F_3 je pro výpočet pevnosti vzorků v tlaku stěžejní. Při tomto stlačení došlo k porušení struktury omítkového vzorku. Dále byla nastavena hranice maximální síly F_{max} [N] na 5000 a rychlost posuvu čelistí 6,0 mm/min. Zastavovací podmínkou bylo zvoleno stlačení na 5,5 mm. Po zadání všech potřebných parametrů probíhalo vlastní měření. Vzorek byl vždy vložen na dolní podložku tak, aby byl v jejím středu a dotýkal se vrchní stranou horní přítlačné podložky. Po dokončení zkoušky se horní čelist s přítlačnou podložkou vrátila do výchozí polohy. Ze získaných dat byly vypočteny konečné tlaky pomocí vzorce:

$$R_m = \frac{F}{A} \quad (10)$$

kde R_m [N/mm²] je tlak, F [N] je síla a A [mm²] plocha průřezu vzorku. [19]

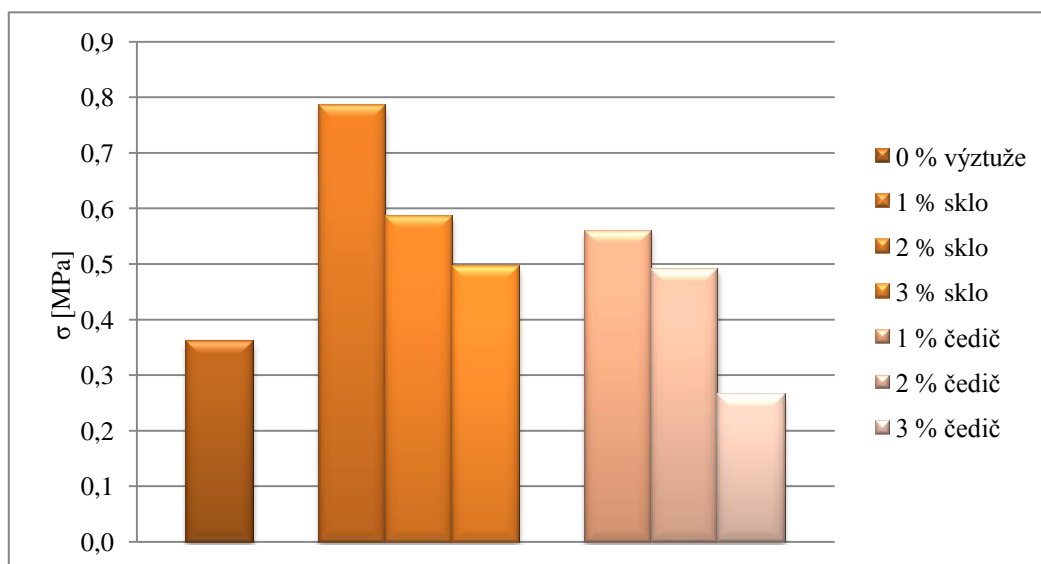
4 Diskuze výsledků

4.1 Zkouška trojbodým ohybem

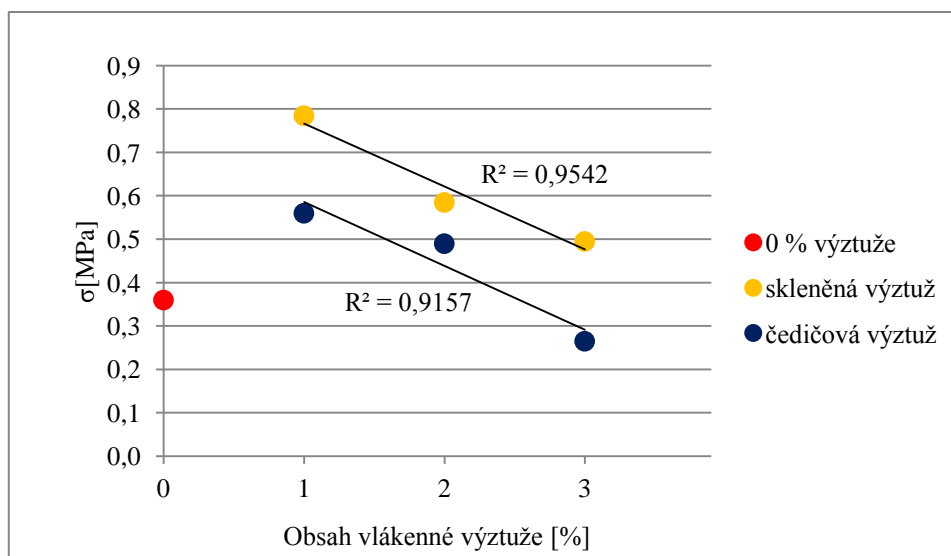
Ke zkoušce namáhání trojbodým ohybem byl použit dynamometr TIRA test 2300. Testováno bylo celkem 7 sad vzorků. Jedna sada čítající 8 vzorků byla pouze z omítky bez vyztužení. Další 3 sady byly z omítky vyztužené skelnými vlákny. Sady se lišily směšovacími poměry. Poslední 3 sady obsahovaly jako výztuž čedičová vlákna. Opět v třech různých poměrech. Měřeno bylo napětí v ohybu R_f [MPa] a modul pružnosti E [N/mm²]. Průměrné hodnoty naměřených veličin jsou uvedeny v tabulkách 4.1 a 4.2. Ke stanovení průměrných hodnot a intervalů spolehlivosti byl z důvodu malého souboru dat použit Hornův postup. Všechna naměřená data jsou uvedeny v příloze č. 3 na přiloženém CD. Grafické znázornění intervalů spolehlivosti v příloze č. 1.

Tab. 4.1: Průměrné výsledky napětí při trojbodém ohybu

Vyztužení skelnými vlákny				Vyztužení čedičovými vlákny			
	R_f [MPa]	95% IS			R_f [MPa]	95% IS	
0 %	0,36	0,29	0,43	0 %	0,36	0,29	0,43
1 %	0,79	0,58	0,99	1 %	0,56	0,30	0,82
2 %	0,59	0,38	0,79	2 %	0,49	0,39	0,59
3 %	0,50	0,31	0,68	3 %	0,27	0,16	0,37



Obr. 4.1: Porovnání napětí v ohybu mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny

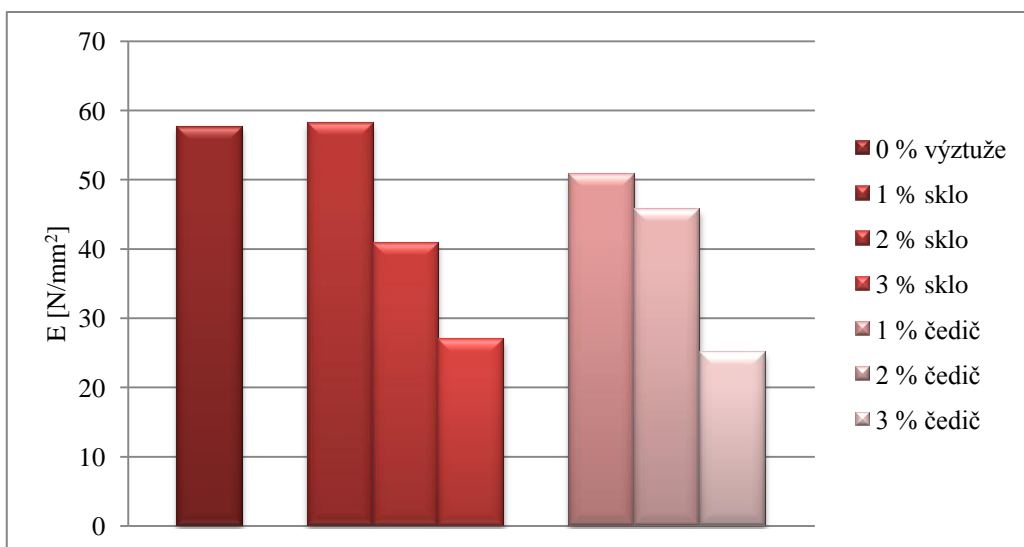


Obr. 4.2: Graf závislosti napětí v ohybu na obsahu vlákně výztuže

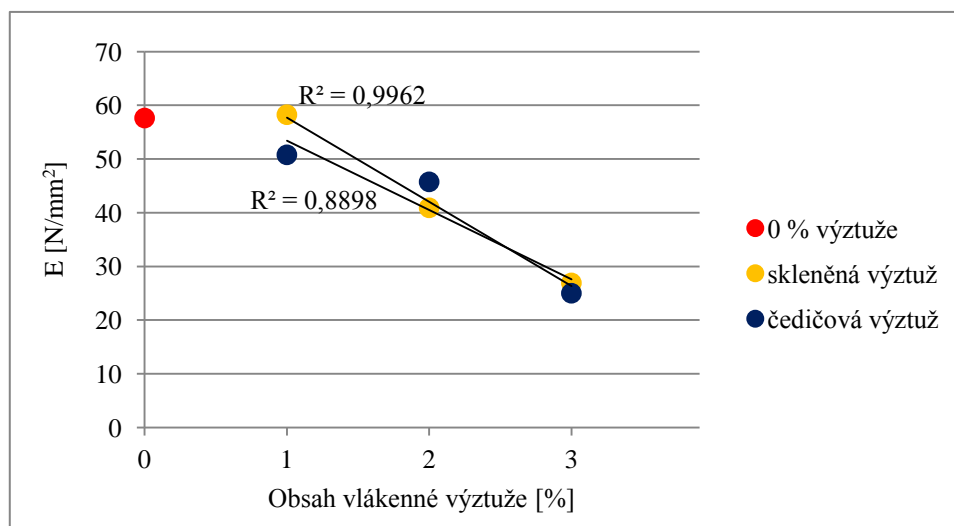
Z hodnot uvedených v tabulce 4.1 a z obrázku 4.1 je zřejmé, že výztuž ze skleněných vláken má větší zesilující účinek s ohledem na napětí v ohybu než výztuž z vláken čedičových. Byly testovány omítky se třemi různými poměry vlákně výztuže, a to 1%, 2% a 3% vyztužení. U obou druhů výztuží se 1% obsah ve směsi jeví jako nejvhodnější. Při zkoušce trojbodým ohybem vzorky z 1% směsi vykazovaly nejvyšší hodnotu napětí v ohybu. U vzorků s vyšším obsahem vláken se napětí v ohybu snižovalo. Se zvyšujícím se obsahem vláken samozřejmě klesá obsah matrice, což způsobuje, že vlákna výztuže jsou hůře propojená a napětí se tak mezi jednotlivými vlákny nemá jak přenášet. Skleněná vlákna ve všech třech případech zlepšila hodnotu napětí v ohybu konečného kompozitu. Tříprocentní vyztužení čedičovými vlákny už zlepšení neposkytlo. Obrázek 4.2 ukazuje, že existuje silná závislost mezi napětím v ohybu omítkového kompozitu a obsahem vláken ve směsi.

Tab. 4.2: Průměrné výsledky modulu pružnosti při trojbodém ohybu

Vyztužení sklenými vlákny				Vyztužení čedičovými vlákny			
	E [N/mm ²]	95% IS			E [N/mm ²]	95% IS	
0 %	57,62	34,51	80,73	0 %	57,62	34,51	80,73
1 %	58,24	43,59	72,89	1 %	50,77	30,67	70,86
2 %	40,90	23,69	58,11	2 %	45,74	36,64	54,83
3 %	26,91	14,71	39,11	3 %	24,99	8,04	41,94



Obr. 4.3: Porovnání modulu pružnosti mezi omítkou, vyztužením skleněnými a čedičovými vlákny



Obr. 4.4: Graf závislosti modulu pružnosti na obsahu vlákně výztuže

Průměrné hodnoty výsledků z měření modulu pružnosti při trojbodém ohýbání jsou uvedeny v tabulce 4.2. Grafické porovnání výsledků na obrázku 4.3. Hodnoty ukazují, že ke zvýšení modulu pružnosti došlo pouze u skleněné výztuže při 1% poměru. Ostatní poměry vykazují zhoršení modulu pružnosti. Moduly pružnosti vzorků s 1% a 2% obsahem čedičové jsou si velmi blízké.

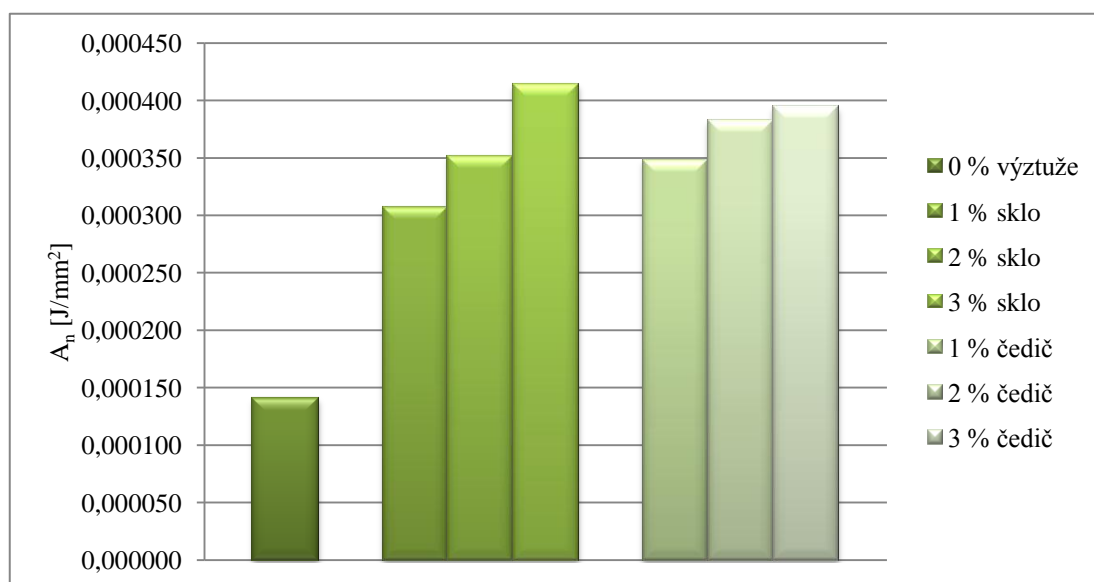
Hodnoty modulu pružnosti i napětí v ohybu u výsledného omítkového kompozitu závisí na orientaci vláken ve vzorku. Je třeba vědět, že možnosti orientace vlákně výztuže při nanášení omítky jsou omezené. Pomocí techniky nahazování a uhlazování lze dosáhnout částečné orientace ve směru tahů. Povrch omítky se vždy musí zhladit, což znemožňuje orientaci vláken kolmo ke směru uhlazování.

4.2 Charpy test

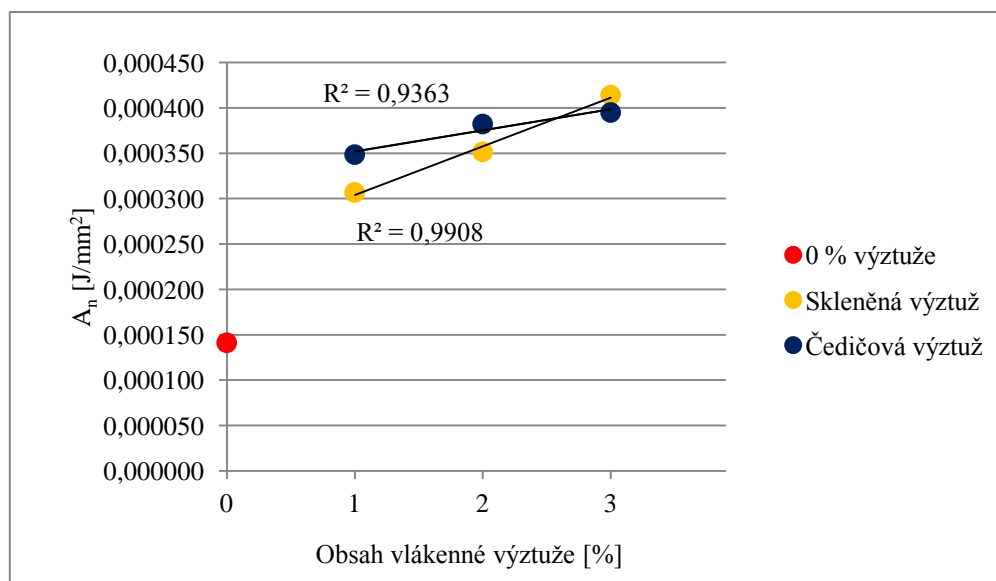
Měření rázové houževnatosti proběhlo na přístroji Rasil 5.5. Opět bylo testováno 7 sad vzorků. Jeden zcela bez výztuže, tři sady vyztužené skleněnými vlákny a tři s vlákny čedičovými ve stejných poměrech jako při předchozí zkoušce (1 %, 2 % a 3 % výztuže). Měřena byla energie potřebná k přeražení vzorku. Ta se následně přepočítala na rázovou houževnatost, teda na energii vztaženou na plochu průřezu vzorku. Průměrné výsledky rázové houževnatosti vzorků jsou uvedeny v tabulce 4.3. Ke stanovení průměrů byl opět použit Hornův postup. Všechny výsledky měření jsou v příloze č. 3 na přiloženém CD. Grafické znázornění intervalů spolehlivosti v příloze č. 1.

Tab. 4.3: Průměrné výsledky rázové houževnatosti

Vyztužení sklenými vlákny				Vyztužení čedičovými vlákny			
	A_n [J/mm ²]	95% IS			A_n [J/mm ²]	95% IS	
0 %	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	0 %	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$
1 %	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$3,80 \cdot 10^{-4}$	1 %	$3,49 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^{-4}$
2 %	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$3,29 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$	2 %	$3,82 \cdot 10^{-4}$	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$
3 %	$4,14 \cdot 10^{-4}$	$2,95 \cdot 10^{-4}$	$5,34 \cdot 10^{-4}$	3 %	$3,95 \cdot 10^{-4}$	$2,71 \cdot 10^{-4}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$



Obr. 4.5: Porovnání rázové houževnatosti mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny



Obr. 4.6: Graf závislosti rázové houževnatosti na obsahu vlákněné výztuže

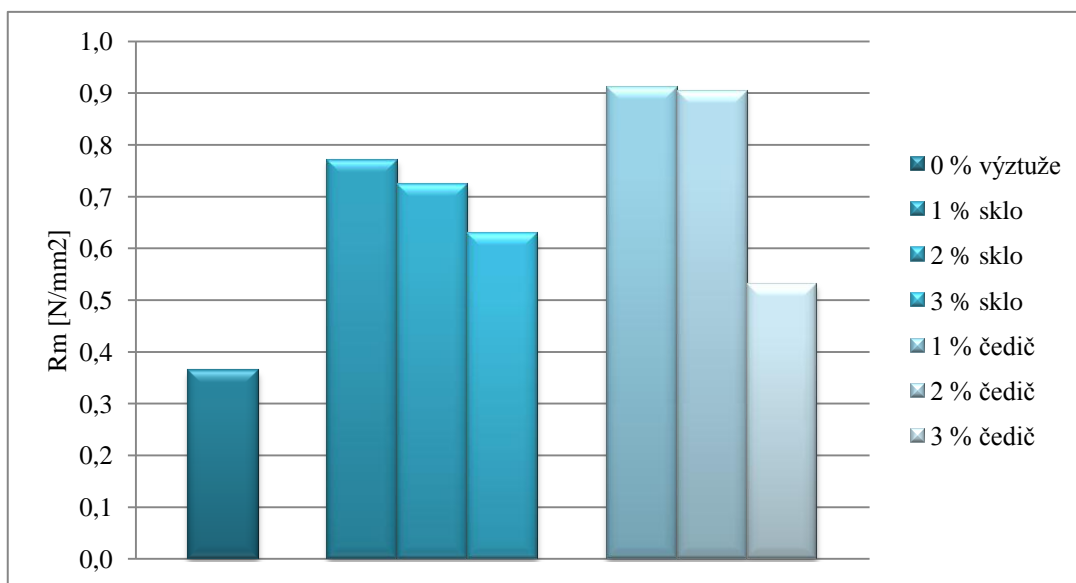
Z výše uvedených výsledků je patrné, že přítomnost vlákněné výztuže v omítce má na rázovou houževnatost příznivý vliv. Se zvyšujícím se obsahem vláken dochází ke zvyšování rázové odolnosti. Na výsledky zkoušky má vliv orientace a rozmístění vláken ve vzorku. Tyto skutečnosti jsou však velmi obtížně ovlivnitelné. Záleží tedy na tom, kolik bylo právě vláken a jakým směrem byla orientována v místě dopadu kladiva. Vyztužující účinek je u skelných vláken velmi blízký účinku čedičových vláken. Obrázek 4.6 znázorňuje silnou závislost mezi obsahem výztuže a rázovou houževnatostí. Při zvyšování obsahu vlákněné výztuže bychom našli maximální zesilující účinek. Za touto hranicí by kompozit ztratil celistvost a funkci.

4.3 Pevnost v tlaku

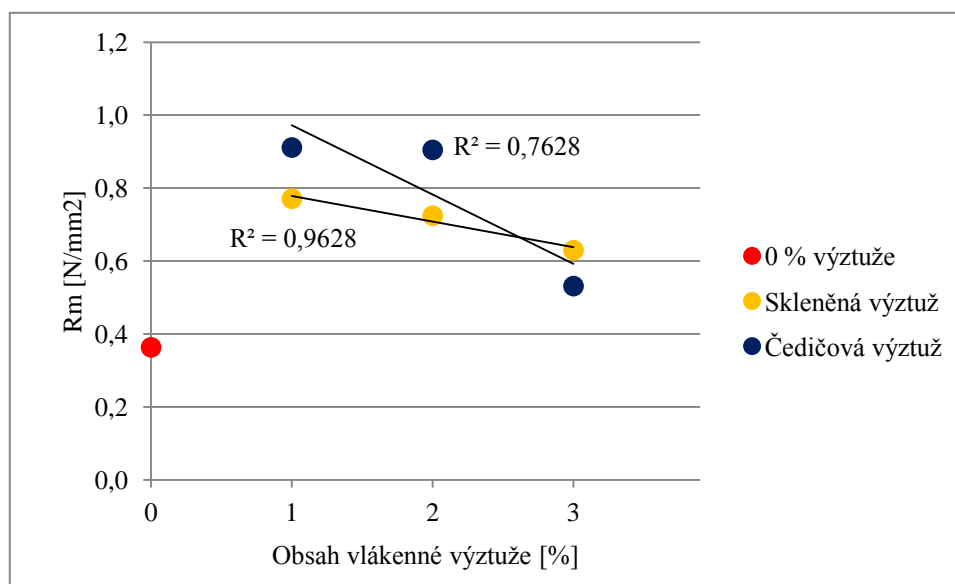
Pevnost v tlaku byla u všech vzorků měřena na dynamometru TIRA test 2300. Touto zkouškou se zjišťovalo, jak ovlivní přítomnost vlákněné výztuže v omítce odolnost vůči tlakovému namáhání. Naměřila se síla, při které docházelo k porušení struktury vzorků. Ta pak byla vztažena na plochu příčného řezu vzorku. Došlo k měření pěti vzorků samotné omítky bez přítomnosti vláken. Dále pak směs omítky vyztuženou 1 % skleněných vláken, 1 % čedičových vláken, 2 % a 3 % obou typů vláken. Od každého typu bylo změřeno 5 vzorků s kruhovým průřezem. Průměrné naměřené hodnoty síly a přepočtené na pevnost v tlaku jsou uvedeny v tabulce č. 4.4. Všechny výsledky měření v příloze č. 3 na CD. Grafické znázornění intervalů spolehlivosti v příloze č. 1.

Tab. 4.4: Průměrné výsledky pevnosti v tlaku

Vyztužení sklenými vlákny				Vyztužení čedičovými vlákny			
	R_m [N/mm ²]	95% IS			R_m [N/mm ²]	95% IS	
0 %	0,36	0,26	0,46	0 %	0,36	0,26	0,46
1 %	0,77	0,27	1,27	1 %	0,91	0,03	1,85
2 %	0,72	0,30	1,15	2 %	0,90	0,40	1,41
3 %	0,63	0,13	1,39	3 %	0,53	0,24	0,82



Obr. 4.7: Porovnání pevnosti v tlaku mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny



Obr. 4.8: Graf závislosti pevnosti v tlaku na obsahu vlákenné výztuže

Z výsledků uvedených v tabulce 4.4 lze vyčíst, že největší zlepšení pevnosti v tlaku bylo 1% výztuží u obou druhů vláken. Čím větší procento vláken v kompozitu bylo, tím klesala jeho odolnost v tlaku. Je zde stejný princip jako u namáhání trojbodým ohybem. Při 1% obsahu vláken v omítce je optimální poměr mezi matricí a výztuží. Matrice dobře obaluje a spojuje všechna vlákna, čímž umožňuje přenos zatížení na vlákna. U vyššího procenta vyztužení už nejsou vlákna matricí spojena tak dobře, takže nedochází k dobrému přenosu zatížení z matrice na výztuž. Vzorky se dvou a tří procentním obsahem vláken vykazovaly nižší hodnoty vyztužení, přesto však i ony odolávaly tlakovému zatížení lépe než samotná omítka. Čedičová vlákna se pro zvýšení odolnosti v tlaku jeví jako vhodnější, měla větší vyztužující účinek než vlákna skleněná. Grafické porovnání průměrných výsledků je zobrazeno na obr. 4.7. Obrázek 4.8 ilustruje závislost pevnosti v tlaku na obsahu vlákenné výztuže. Je zde vidět silná závislost tlakové odolnosti na obsahu výztuže v omítkovém kompozitu.

Při zkoušení tlakové odolnosti vzorků samotné omítky bez vlákenné výztuže docházelo k praskání a následnému drobení až rozpadu vzorků. Všechny vzorky vyztužené vlákennou výztuží si po zkoušce zachovaly svojí celistvou strukturu. Z principu zkoušky se zmenšila jejich výška a zvětšil průměr plochy řezu, ale celistvost vzorků zůstala neporušená. Vlákna zajistila, že se trhlinky vzniklé působícím tlakem nešířily strukturou a nedošlo k rozpadu vzorků. Oproti zkouškám v ohybu, kdy se jako lepší výztuž jevila skleněná vlákna, tlaku lépe odolávaly vzorky s čedičovou výztuží.

5 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv na mechanické vlastnosti omítky bude mít přidání vlákenné výztuže do její struktury. Dále pak bylo porovnáváno, který druh výztuže a jaký její obsah je pro zpevnění omítek nejvhodnější. Jelikož se jedná o vyztužování speciální termo-izolační omítky používané pro restaurování historických hrázdných domků, musela být vybrána vlákna tak, aby svými vlastnostmi vyhovovala danému účelu a zároveň byla v souladu s požadavky památkářů. Navržena byla vlákna skleněná, čedičová a konopná. Konopná vlákna jsou přírodní a pro památkáře nejvíce přijatelná. Kvůli jejich nevyhovujícím vstupním parametrům, špatné dostupnosti ve formě sekané výztuže a ceně však byla konopná vlákna z daného experimentu vyloučena.

Pro porovnání vlastností samotné omítky a vyztuženého omítkového kompozitu byly vybrány vlastnosti napětí v ohybu, modul pružnosti v ohybu a pevnost v tlaku. Tyto parametry se měří u omítek běžně a jsou udávány výrobcí v technických listech. Pro lepší porovnání byla k měřeným vlastnostem přidána ještě rázová houževnatost. Jedná se o vlastnost, která může pomoci při hodnocení kvality omítky nebo výsledného kompozitu.

Ke stanovení napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu byla použita zkouška namáhání trojbodým ohybem. Měření rázové houževnatosti proběhlo na Charpyho kladivu a pevnost v tlaku byla stanovena klasickou tlakovou zkouškou na dynamometru.

Při výrobě vzorků omítkového kompozitu bylo nutné pozměnit rozměry vzorků, a to z důvodu zkoušení rázové houževnatosti Charpy testem. Protože rázová houževnatost omítek je v porovnání s maltami výrazně menší, bylo nutné použití menšího Charpyho kladiva a tím i menších vzorků. Míchání směsi, příprava a tvrdnutí vzorků bylo v souladu s normou *ČSN EN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanoví pevností zatvrdlých malt v tahu a v tlaku*.

Z výsledků měření při namáhání trojbodým ohybem a z měření pevnosti v tlaku je zjevné, že optimální vyztužující účinek mají vzorky s jedním procentem vlákenné výztuže. Čím více vláken ve vzorcích je, tím je napětí v ohybu, modul pružnosti i pevnost v tlaku nižší. Tento jev souvisí s přenášením zatížení mezi vlákna a maticí. Pokud je v kompozitu větší množství vláken a méně spojovací matrice (omítky),

zatížení se z matrice na vlákna přenáší obtížně. U měření rázové houževnatosti lze pozorovat opačný trend než u předchozích zkoušek. Se zvyšujícím se obsahem vlákenné výztuže se zvyšuje i rázová odolnost vzorku. Avšak i jednoprocentní výztuž zlepšila odolnost omítky více než dvojnásobně u skleněné i čedičové výztuže.

Ze získaných výsledků lze pro zlepšení odolnosti omítek vůči mechanickému namáhání doporučit vyztužení jedním procentem skleněné vlákenné výztuže. Dobré výsledky mají skleněná i čedičová vlákna, avšak skleněná jsou zatím na našem trhu levnější a dostupnější.

Pro upřesnění výsledků výše zmíněných zkoušek by bylo vhodné změřit vlastnosti omítkových kompozitů s obsahem 0,5 % vlákenné výztuže. Z grafů závislostí se lze domnívat, že tento obsah vláken by mohl vyhovovat ještě lépe, než vyztužení 1% výztuží. A to jak po ekonomické stránce, tak po stránce zlepšení vlastností. Dále by bylo dobré provést měření výše uvedených vlastností po vystavení vzorků klimatickým vlivům, jakými jsou kyselé deště nebo změny teplot. V této práci nebylo pro provedení těchto měření prostor. Výsledky by však mohly přinést poznatky, jež by se daly v oblasti stavebnictví využít.

Použitá literatura

- [1] BERTHELOT, J-M.: *Composite Materials*, Springer 1999
- [2] KOZLOVSKÁ, H., BOHANESOVÁ, B.: *Oděvní materiály I*, Informatorium 1998
- [3] BLAHA, M.: *Omítky*, Grada, 2004
- [4] KOVAČIČ, V.: *Zkoušení textilií* [přednášky], TU Liberec 2010. Dostupné též z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/>
- [5] Čedič [online]. *Charakteristika čedičových vláken* [citováno 13. 4. 2013]. Dostupné z: http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
- [6] BTTO [online]. *Základní princip skleněných vláken* [citováno 13. 4. 2013]. Dostupné z: <http://btto.cz/cs/zakladni-princip-vyroby-sklenenych-vlaken>
- [7] Czechdesign.cz [online]. *Skleněná vlákna – historie a současnost* [citováno 13. 4. 2013]. Dostupné z: <http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>
- [8] ECTA [online]. *Výrobky ze skelného vlákna* [citováno 16. 4. 2013]. Dostupné z: <http://www.ecta-gmbh.de/czech/glasfaser.html>
- [9] Mikromechanika [online]. *Kompozity* [citováno 16. 4. 2013]. Dostupné z: <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>
- [10] Nauka o materiálu [online]. *Přednáška 14 – kompozity* [citováno 10. 5. 2013]. Dostupné z: http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide14_Kompozity.pdf
- [11] DAĐOUREK, K.: *Kompozitní materiály* [online]. TU v Liberci 2008. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [12] Betonsan [online]. *Produkty* [citováno 19. 9. 2013]. Dostupné z: <http://betosan.cz/>
- [13] Weber [online]. *Fasády* [citováno 23. 10. 2013]. Dostupné z: <http://www.weber-terranova.cz>
- [14] TOMKOVÁ, B.: *Kompozity s textilní výztuží* [přednášky], TU v Liberci, 2014
- [15] BROŽ, J. a KOL. *Základy fyzikálních měření I*, 1. vyd., Praha: SPN

- [16] CALLISTE, William, D.: *Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc, 2007. Těž dostupné z:
<http://jpkc.fudan.edu.cn/picture/article/255/ba/c4/ceea01074b18aa612e67c5c8ed3d/14e79255-e194-4093-98f3-c1317c2adc73.pdf>
- [17] VRBKA, J: *Mechanika kompozitů*, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008
- [18] Dynamické zkoušky [online]. *Rázová a vrubová houževnatost* [citováno 1. 5. 2014]. Dostupný z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf
- [19] ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovní pevností zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2000

Seznam obrázků

Obr. č. 2.1:	Částicový kompozit	12
Obr. č. 2.2:	Druhy vláknenných kompozitů	13
Obr. č. 2.3:	Vyztužení omítky perlinkou ze skleněných vláken	16
Obr. č. 2.4:	Pohled na čedičová vlákna v elektronovém rastrovacím mikroskopu	22
Obr. č. 2.5:	Výrobní schéma krátkých čedičových vláken	23
Obr. č. 2.6:	Pohled na skleněná vlákna v rastrovacím elektronovém mikroskopu	25
Obr. č. 2.7:	Schéma sklářského kontinuálního stroje	26
Obr. č. 2.8:	Pohled na konopná vlákna v rastrovacím elektronovém mikroskopu	30
Obr. č. 3.1:	Řez svazkem konopných vláken pod mikroskopem	32
Obr. č. 3.2:	Průběh zkoušky soudržnosti čedičových vláken s matricí	33
Obr. č. 3.3:	Přenos napětí ve vlákně	36
Obr. č. 3.4:	Smykové napětí mezi vláknem a matricí	36
Obr. č. 3.5:	Schéma trojbodého ohybu	39
Obr. č. 3.6:	Průběh zkoušky trojbodého ohybu	41
Obr. č. 3.7:	CEAST Resil 5.5	42
Obr. č. 4.1:	Porovnání napětí v ohybu mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny	44
Obr. č. 4.2:	Graf závislosti napětí v ohybu na obsahu vláknenné výztuže	45
Obr. č. 4.3:	Porovnání modulu pružnosti mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny	46
Obr. č. 4.4:	Graf závislosti modulu pružnosti na obsahu vláknenné výztuže	46
Obr. č. 4.5:	Porovnání rázové houževnatosti mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny	47
Obr. č. 4.6:	Graf závislosti rázové houževnatosti na obsahu vláknenné výztuže	48
Obr. č. 4.7:	Porovnání pevnosti v tlaku mezi omítkou, vyztužením skelnými a čedičovými vlákny	49
Obr. č. 4.8:	Graf závislosti pevnosti v tlaku na obsahu vláknenné výztuže	49

Seznam tabulek

Tab. č. 2.1:	Rozdělení omítek dle složení	18
Tab. č. 2.2:	Přehled vad omítek, jejich příčin a předcházení	20
Tab. č. 2.3:	Fyzikální vlastnosti čedičových vláken	24
Tab. č. 2.4:	Fyzikální vlastnosti skelných vláken	28
Tab. č. 3.1:	Parametry skleněných, konopných a čedičových vláken	31
Tab. č. 3.2:	Soudržnost vlákna s matricí	34
Tab. č. 3.3:	Hustoty vláken	34
Tab. č. 3.4:	Průměrné parametry omítky	35
Tab. č. 3.5:	Vypočtené hodnoty kritických a efektivních délek vláken	39
Tab. č. 3.6:	Konečné hodnoty vlákenné výztuže	37
Tab. č. 3.7:	Hmotnostní podíl vlákenné složky	38
Tab. č. 3.8:	Hmotnosti jednotlivých vložek pro výrobu 110 g směsi	38
Tab. č. 4.1:	Průměrné výsledky napětí při trojbodém ohybu	44
Tab. č. 4.2:	Průměrné výsledky modulu pružnosti při trojbodém ohybu	45
Tab. č. 4.3:	Průměrné výsledky rázové houževnatosti	47
Tab. č. 4.4:	Průměrné výsledky pevnosti v tlaku	49

Seznam tištěných příloh

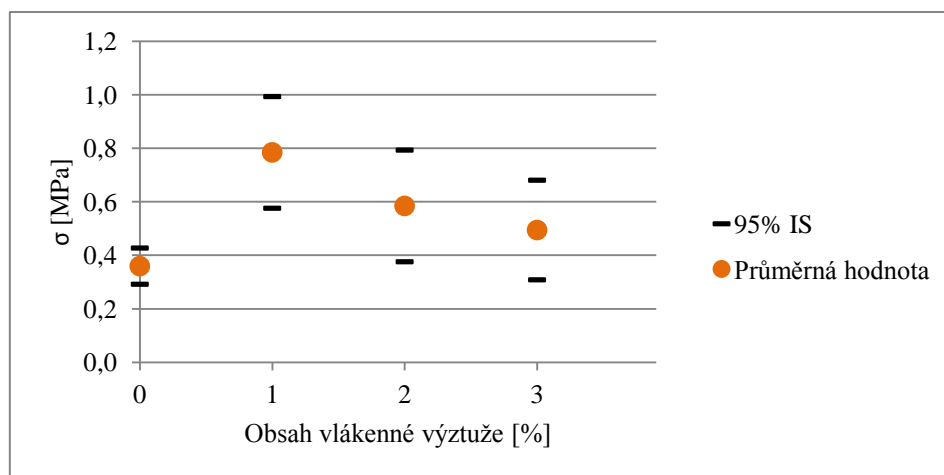
Příloha č. 1	Grafické znázornění 95% intervalů spolehlivosti
--------------	---

Seznam příloh na CD

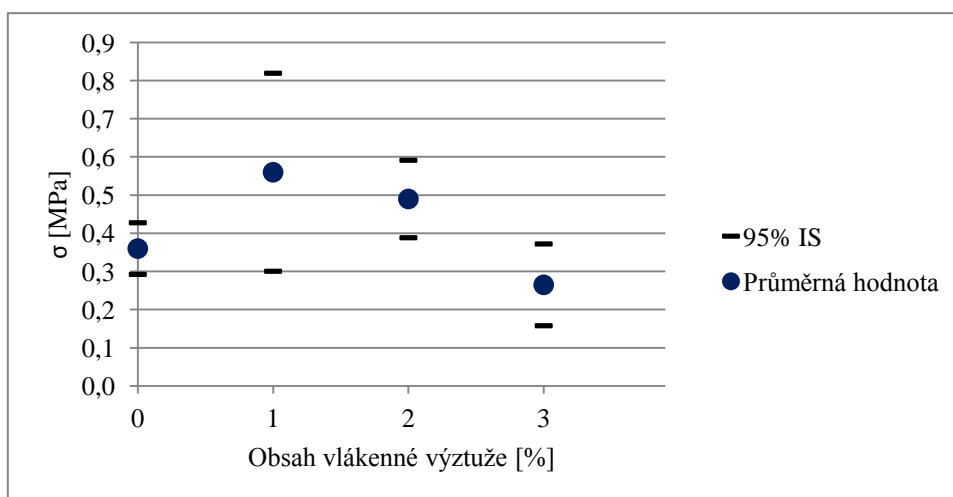
Příloha č. 2	Parametry vláken
Příloha č. 3	Zkoušky omítek

Příloha č. 1

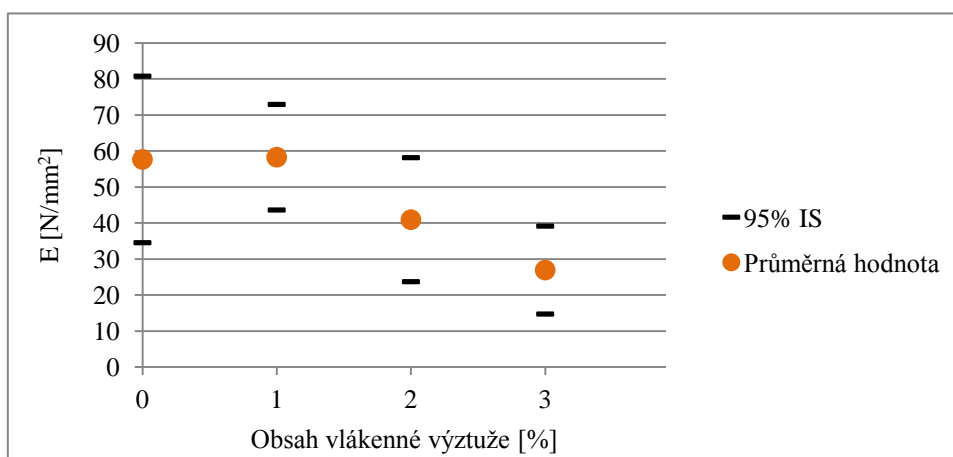
Grafické znázornění 95% intervalů spolehlivosti



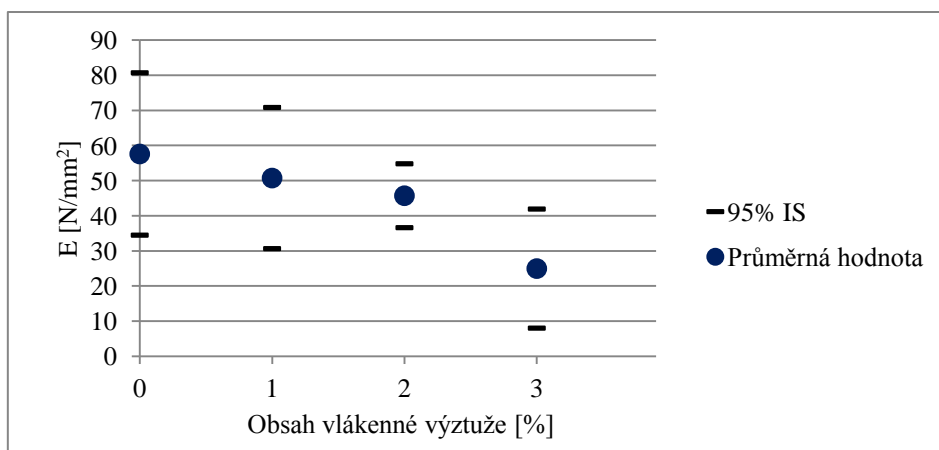
Obr. 1: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti napětí v ohybu – skleněná vlákna



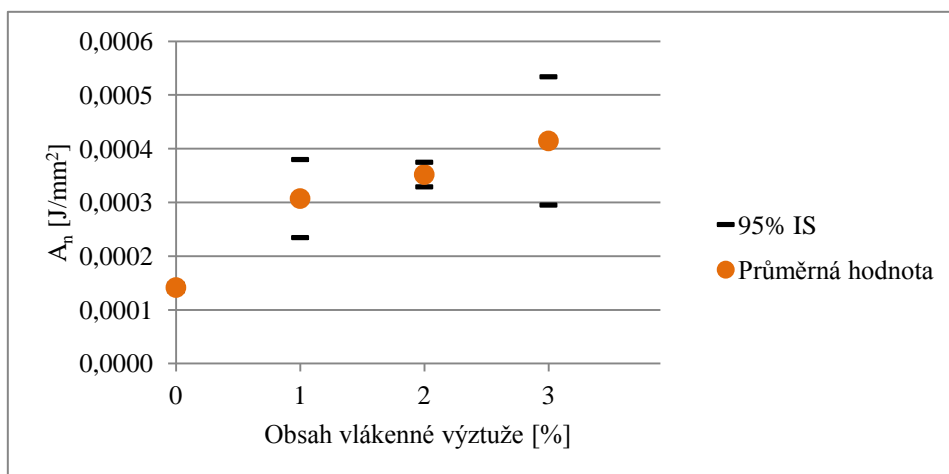
Obr. 2: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti napětí v ohybu – čedičová vlákna



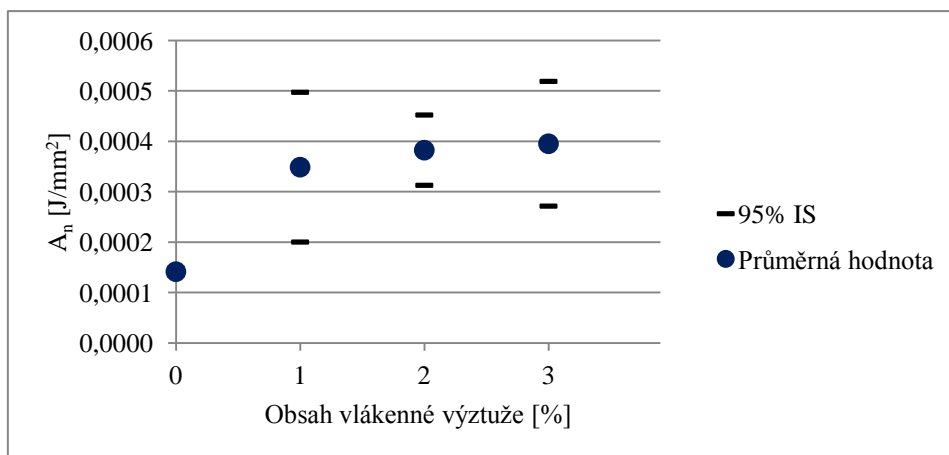
Obr. 3: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti modulu pružnosti v ohybu – skleněná vlákna



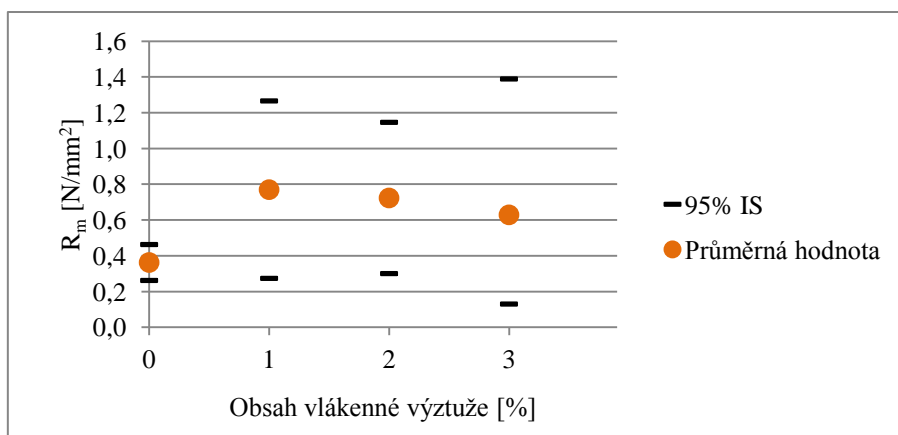
Obr. 4: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti modulu pružnosti v ohybu – čedičová vlákna



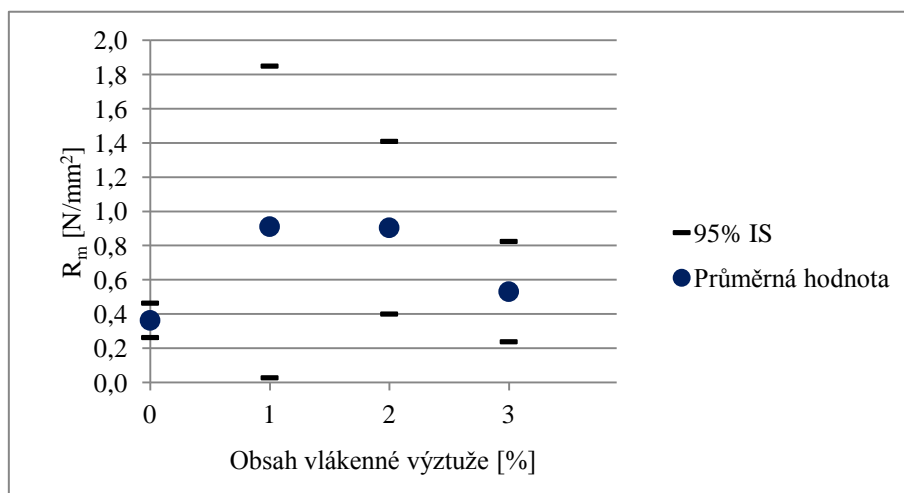
Obr. 5: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti rázové houževnatosti – skleněná vlákna



Obr. 6: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti rázové houževnatosti – čedičová vlákna



Obr. 7: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti pevnosti v tlaku – skleněná vlákna



Obr. 8: Průměrné hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti pevnosti v tlaku – čedičová vlákna